



TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISIS KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER
SA210-A1 B-1102 DI PABRIK 1 PT. PETROKIMIA
GRESIK**

NABIL
NRP 2112 100 074

Dosen Pembimbing
Ir. WITANTYO, M.Eng.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT - TM 141585

**FAILURE ANALYSIS ON ECONOMIZER U-TUBE
SA210-A1 B-1102 OF PT. PETROKIMIA GRESIK
PLANT 1**

NABIL
NRP 2112 100 074

Advisor
Ir. WITANTYO, M.Eng.Sc

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

ANALISIS KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER SA 210-A1 B-1102 DI PABRIK 1 PT. PETROKIMIA GRESIK

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NABIL

NRP. 2112 100 074

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc (Pembimbing)
NIP. 196303141988031002
2. Ir. Sampurno, MT (Penguji I)
NIP. 196504041989031002
3. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT (Penguji II)
NIP. 198604012015041001
4. Dinny Harnany, ST, MSc (Penguji III)
NIP. 2100201405001



**SURABAYA
JANUARI, 2018**

ANALISA KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER SA210-A1 B-1102 DI PABRIK 1 PT. PETROKIMIA GRESIK

Nama Mahasiswa	: NABIL
NRP	: 2112100074
Jurusan	: Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing	: Ir. Witantyo, M.Eng.Sc

Abstrak

Economizer merupakan komponen penting dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 4-6% di dalam sistem boiler pipa air. Kegagalan pada pipa u-tube economizer SA210-A1 Boiler-1102 PT. Petrokimia terjadi pada lengkungan dalam pipa. Untuk menanggulangi hal yang serupa, analisa kegagalan pada u-tube economizer ini perlu dilakukan. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung hasil analisa. Secara visual, terdapat lubang dari dalam keluar u-tube. Secara metalografi terdapat korosi berbentuk mikrocrack didalam lubang tube. Hasil analisa dan data-data yang diperoleh, kebocoran yang terjadi disebabkan oleh adanya korosi pitting pada sisi dalam tube akibat terjadinya penurunan tekanan pada saat air melalui u-tube sehingga oksigen terlarut naik keatas ke permukaan dalam tube dan terjadi korosi. Adanya oksigen terlarut yang masuk ke economizer akibat oxygen scavenger yang di injeksikan di dalam dearator belum bereaksi secara sempurna karena adanya fluktuasi temperatur.

Kata kunci: U-tube, economizer, kebocoran, korosi pitting

FAILURE ANALYSIS ON ECONOMIZER U-TUBE SA210-A1 B-1102 OF PT. PETROKIMIA GRESIK PLANT 1

Name : NABIL
NRP : 2112100074
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Supervisor : Ir. Witantyo, M.Eng.Sc

Abstract

Economizer is an important component to enhance the efficiency of transferring heat up to 4-6 % in boiler system of water tube. Failure on economizer u-tube pipe sa210-a1 boiler-1102 PT. Petrokimia occurred in u-tube to overcome such problem, failure on u-tube economizer analysis needs to be conducted. Several tests have been conducted to support the analysis finding. Visually there was a hole from inside to outside u-tube. metallografically, there was a corrosion in the form of microcrack in side the tube hole. The result of the analysis and based on data obtained, the leak was caused by pitting corrosion on the side within the tube resulting from the decrease of pressure during the water flow through u-tube so that the oxygen was going up on to the surface in side the tube and corrosion occurred oxygen existed entering into economizer due to the scavenger oxygen injected in deaerator did not completely reaction because of the temperature fluctuating.

Key word: *U-tube, economizer, leakage, corrosion pitting*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan karunia-Nya penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin FTI ITS. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Anis Badres, Drs dan Luluk Ba'atwah. kedua orang tua tercinta yang senantiasa memberi dukungan dan doa sehingga penulis mampu menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin.
2. Muhammad Najib, Muhammad Nashir, Muhammad Nadir. kakak dan adik tercinta yang telah memberi dukungan dan doa sehingga sehingga penulis mampu menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin.
3. Seluruh keluarga Badres dan Ba'atwah tercinta yang telah memberi dukungan dan doa sehingga sehingga penulis mampu menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin.
4. Bapak Ir. Witantyo, M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang membimbing penulis dengan penuh kesabaran.
5. Bapak Ari Kurniawan, ST., MT., Ibu Dinny Harnany, ST., M.Sc., dan Bapak Ir. Sampurno, MT selaku dosen penguji.
6. Bapak Angga, Mas Antok, Mas Dhida dan Mas Fanny selaku pihak dari PT. Petrokimia Gresik yang telah membimbing dan membantu dalam pengambilan data.
7. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin yang telah membantu penulis atas pengetahuan dan pembelajaran yang telah diberikan.
8. Fiorentina Meisyaheta Ayu Putri Bintari yang selalu bersedia memberikan motivasi dan mendengarkan curahan hati penulis.
9. Romario, Delia, Diastanto, Rexa, Bramantio, Anna, Putri yang berjuang bersama di Laboratorium Rekayasa Sistem Industri dan teman-teman Teknik Mesin angkatan 2012 (M55) yang telah berbagi pengalaman selama di bangku perkuliahan.

Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan maka penulis bersedia menerima kritik dan saran untuk penelitian yang lebih baik.

Surabaya 8 Januari 2018
Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

Abstraki

KATA PENGANTAR.....v

DAFTAR ISIxii

DAFTAR GAMBARxii

DAFTAR TABEL.....xv

BAB I 1

PENDAHULUAN..... 1

1.1 Latar Belakang..... 1

1.2 Rumusan Masalah.....6

1.3 Tujuan Penelitian6

1.4 Batasan Masalah6

1.5 Manfaat Penelitian 7

BAB II9

TINJAUAN PUSTAKA.....9

2.1 BOILER PIPA AIR (*WATER TUBE BOILER*)9

2.2 ECONOMIZER 11

2.3 ANALISA KEGAGALAN..... 12

2.4 BAJA KARBON (*CARBON STEEL*) 15

2.5 KOROSI 18

2.6 FAKTOR-FAKTOR MEDIA AIR YANG
BERPENGARUH TERHADAP LAJU KOROSI..... 22

2.6.1 Komposisi Air 22

2.6.2 Nilai pH..... 23

2.6.3 Temperatur	24
2.6.4 Kecepatan dan Agitasi Air	25
2.7 KOROSI INTERGRANULAR.....	25
2.8 KOROSI PITTING	29
2.10 MACAM- MACAM KEGAGALAN ECONOMIZER AKIBAT KOROSI	33
2.10.1 Kegagalan Economizer Akibat Low pH corrosion during service	33
2.10.2 Kegagalan Economizer Akibat <i>Oxygen corrosion</i>	34
2.10.3 Kegagalan Economizer Akibat Cold-end corrosion during service	35
2.10.4 Kegagalan Economizer Akibat Dew - point corrosion during idle periode	37
2.10.5 Kegagalan Economizer Akibat <i>Stress corrosion cracking</i>	38
2.10.6 Kegagalan Economizer Akibat <i>Erosi corrosion</i>	40
2.11 STRESS CORROSION CRACKING	41
BAB III.....	49
METODOLOGI PENELITIAN	49
3.1 Diagram Alir Penelitian	49
3.2 Metodologi Penelitian.....	50
3.3 BAHAN PENELITIAN.....	50
3.4 ALAT-ALAT PENELITIAN	51
3.5 TAHAPAN PENELITIAN	52
3.5.1 Data Operasional Lapangan	52
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	52
BAB IV	57

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	57
4.1 ANALISA DATA.....	57
4.1.1 Data Operasi Lapangan	57
4.1.2 Hasil Pengamatan Visual <i>U-Tube</i>	61
4.1.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>U-Tube</i>	62
4.2 PEMBAHASAN.....	64
4.2.1 Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan	64
4.3 SOLUSI DAN REKOMENDASI.....	73
BAB V	75
KESIMPULAN DAN SARAN	75
DAFTAR PUSTAKA	77
BIODATA PENULIS.....	79

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sirkulasi air/uap pada boiler [2].....	9
Gambar 2. 2 (a) Economizer coil dan (b) profil temperatur gas buang dan Air [3]	11
Gambar 2. 3 Efek penambahan tembaga terhadap uniform atmospheric corrosion pada baja [5]	15
Gambar 2. 4 Efek penambahan unsur-unsur yang lain terhadap uniform Industrial atmospheric corrosion pada baja, (a) krom, (b)silikon, (c)fosfor, (d) nikel. [5]	17
Gambar 2. 5 Sel korosi yang terjadi pada logam [6]	18
Gambar 2. 6 Rangkaian sel korosi [6]	19
Gambar 2. 7 Pengaruh pH terhadap korosi baja karbon [7].....	24
Gambar 2. 8 Pengaruh temperatur pada korosi besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut (<i>oxygen dissolved</i>) [7]	24
Gambar 2. 9 Pengaruh kecepatan aliran air pada korosi baja. Pada awalnya, peningkatan oksigen akan meningkatkan korosi, Kemudian terjadi passivasi oksigen yang menurunkan korosin [8]	25
Gambar 2. 10 Korosi Intergranular [9]	26
Gambar 2. 11 Perilaku polarisasi anodik dari paduan aktif-pasif dengan batas butir habis zona (skematis) [9]	27
Gambar 2. 12 Perilaku polarisasi anodik dari paduan aktif-pasif dua fasa (skematik) [9]	28
Gambar 2. 13 Contoh dari deep pits (a) dan	29
Gambar 2. 14 Berbagai Bentuk Korosi Sumuran [10].....	30
Gambar 2. 15 Permukaan Anoda yang Sempit dan Katoda yang Luas [10]	31
Gambar 2. 16 Mekanisme Korosi Sumuran [10]	32
Gambar 2. 17 Gouging di sepanjang permukaan dalam sirip berlawanan [11]	33
Gambar 2. 18 Kapsul oksida besi yang menutupi lokasi pit [11]	34
Gambar 2. 19 Kontur macet dari tube economizer yang terpapar asam sulfat kental. (Pembesaran: 7,5 X.) [11].....	36

Gambar 2. 20 Korosi dan perforasi tabung economizer bersirip yang dihasilkan dari paparan asam sulfat kental. Perhatikan detasemen sirip dari dinding tube [11]	37
Gambar 2. 21 Permukaan eksternal tube economizer mengikuti titik embun korosi [11]	38
Gambar 2. 22 Tebal longitudinal sepanjang sisi tikungan 90 ° dalam u-tube economizer. Sebuah celah yang sama terletak di sisi yang berlawanan. [11]	39
Gambar 2.23 Pecahnya tube economizer yang disebabkan oleh erosi permukaan luar lokal yang parah terkait dengan bahan partikulat yang dimasukkan ke dalam gas buang [11]	41
Gambar 2. 24 Tiga faktor utama penyebab stress corrosion cracking (SCC) [12]	42
Gambar 2. 25 Branching crack pada SCC, (a) transgranular dan	43
Gambar 2. 26 Pengaruh faktor elektrokimia dan mekanik relatif terhadap terjadinya korosi dan SCC [15]	46
Gambar 2. 27 Pengaruh stress intensity factor terhadap kinetik SCC [15].....	47
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	49
Gambar 3. 2 U-tube yang mengalami kegagalan.....	51
Gambar 3. 3 Alat pemotong, yaitu (a) gergaji, (b) gerinda tangan, dan (c) cutting wheel	53
Gambar 3. 4 Metkon Grinder and Polisher	54
Gambar 3. 5 Miskroskop Optik Olympus BX60M	54
Gambar 4. 1 Kebocoran yang terjadi pada <i>u-tube economizer</i>	58
Gambar 4. 2 Desain Economizer B-1102 PT. Petrokimia Gresik (tampak atas).....	59
Gambar 4. 3 Dimensi u-tube.....	60
Gambar 4. 4 Skema pengambilan sample pada tube yang gagal.....	61
Gambar 4. 5 Sample yang telah dipotong memperlihatkan lubang pada bagian dalam tube.....	62
Gambar 4. 6 Daerah yang dilakukan pengujian metalografi pada tube yang gagal.....	63

Gambar 4. 7 Pengamatan strukturmikro u-tube yang gagal dengan perbesaran 500x.....	64
Gambar 4. 8 Rata-rata pH feedwater boiler tahun 2011-2013.....	66
Gambar 4. 9 Ilustrasi mekanisme terjadinya turbolensi pada u-tube.....	67
Gambar 4. 10 Siklus boiler.....	71
Gambar 4. 11 Grafik oxygen corrosion pada boiler tahun 2011-2013.....	73

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Permasalahan dalam kegagalan komponen	13
Tabel 2. 2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin [4].....	13
Tabel 2. 3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin [4]	14
Tabel 2. 4 Electromotive force series [7]	20
Tabel 2. 5 Anion dan Kation yang terdapat di perairan alami.....	23
Tabel 2. 6 Analisa tipe-tipe perairan alami [6]	23
Tabel 2. 7 Kasus Low pH corrosion during service di industri kimia [11]	33
Tabel 2. 8 Spesifikasi Economizer Kasus Oxygen Corrosion Di Industri Kimia [11].....	34
Tabel 2. 9 Spesifikasi Economizer Kasus Cold-end Corrosion During Service Di Indutri Kertas [11].....	35
Tabel 2. 10 Spesifikasi Economizer Kasus Cold-End Corrosion During Service Di Industri Gula [11].....	36
Tabel 2. 11 Spesifikasi Economizer Kasus Dew - Point Corrosion During Idle Periode Di Industri Kertas [11].....	37
Tabel 2. 12 Spesifikasi Economizer Kasus Stress Corrosion Cracking Di Industri Kertas [11].....	38
Tabel 2. 13 Spesifikasi Economizer Kasus Erosi corrosion di industri kertas [11]	40
Tabel 2. 14 Lingkungan-Baja karbon yang menimbulkan SCC [4]	45
Tabel 3. 1 Komposisi u-tube economizer berdasarkan ASTM A210.....	50
Tabel 3. 2Sifat mekanik SA210-A1 berdasarkan ASTM A210 ..	51
Tabel 4. 1 Data statistik kebocoran yang terjadi pada economizer.....	57
Tabel 4. 2 Spesifikasi tube	59
Tabel 4. 3 Data operasi pada economizer.....	60

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

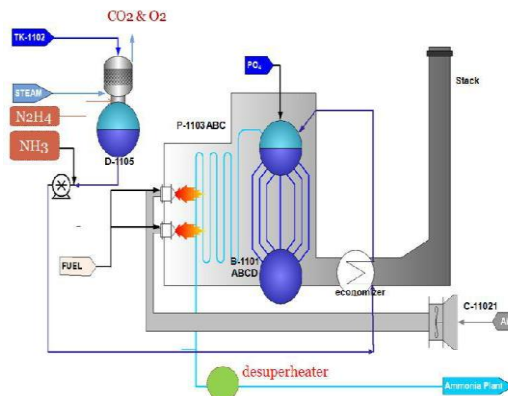
1.1 Latar Belakang

PT. Petrokimia Gresik merupakan perusahaan berstatus BUMN (Badan Usaha Milik Negara) dalam lingkup Departemen Perindustrian dan Perdagangan yang bergerak dalam bidang produksi pupuk, bahan-bahan kimia (H_2SO_4 , H_2PO_4 , CO_2 , cement retarder, aluminium fluoride) dan jasa lainnya seperti konstruksi. PT. Petrokimia Gresik merupakan pabrik pupuk tertua kedua di Indonesia setelah PT. Pupuk Sriwijaya (PUSRI) di Palembang dan juga merupakan pabrik pupuk terlengkap di antara pabrik pupuk lainnya. Jenis pupuk yang diproduksi oleh PT. Petrokimia Gresik antara lain: Zwavelzuur Ammonium (ZA I, ZA II, ZA III), Super Phospat (SP-36 I/TSP 1, SP-36 II/TSP2), NPK/PHONSKA dan Urea.

PT. Petrokimia Gresik mempunyai 3 (tiga) lokasi pabrik, yaitu Pabrik I, Pabrik II, dan Pabrik III. Pabrik-pabrik tersebut memiliki proses produksi dan menghasilkan bahan yang berbeda-beda. Pabrik I (pabrik pupuk nitrogen) menghasilkan Amoniak, ZA I dan III, Urea, CO_2 dan Dry Ice, dan Utility. Pabrik II (Pabrik pupuk Fosfat) menghasilkan SP-36 1&2, Phonska, Tank yard amoniak dan Phospat. Pabrik III (pabrik Asam Fosfat) menghasilkan Asam Sulfat, Asam Phospat (H_3PO_4), Aluminium Fluoride (AlF_3), dan Cement Retarder, ZA II.

Salah satu hal yang menunjang dari seluruh aktifitas produksi adalah peran *package boiler* (Gambar 1.1). Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air

menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Uap ini yang akan digunakan untuk menjalankan proses produksi di Pabrik 1, yaitu Pabrik Pupuk Nitrogen.



Gambar 1.1 *Package Boiler* (Sumber : Report pemeliharaan pabrik1 PT. Perokimia Gresik 2013)

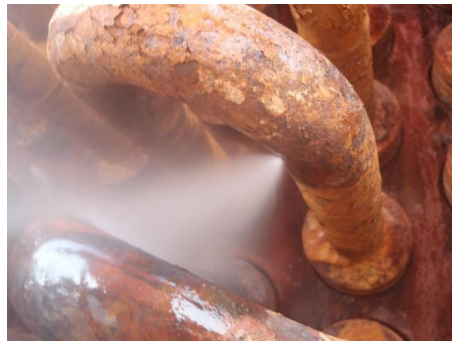
Salah satu komponen penting dalam boiler adalah *economizer*. Economizer terdiri dari pipa-pipa yang menghubungkan *feed water* dan *steam drum* guna memanaskan air hingga hampir mencapai titik didih. Economizer Pada Boiler (B-1102) di Pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik beroperasi pada tahun 2008, namun sejak tahun 2011 mulai mengalami kegagalan berupa kebocoran pada *u-tube* dengan frekuensi yang diperlihatkan pada Tabel 1.1:

Tabel 1.1 Data statistik kebocoran yang terjadi pada economizer

No	Tanggal	Deskripsi Kebocoran
1	19 Maret 2011	Bocor 1 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
2	19 April 2012	Bocor 4 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
3	11 Juni 2012	Bocor 8 ea, 6 bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan
4	1 Januari 2013	Bocor 5 ea, 3ea bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan



(a)



(b)

Gambar 1.2 Kebocoran yang terjadi pada *u-tube economizer*

Permasalahan ini pernah diangkat ditahun 2015 oleh Mahasiswa dari Departemen Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang bernama Gusti Umindya Nur Tajjala, Metode yang digunakan dalam penelitiannya antara lain studi lapangan, studi literatur, dan penelitian di laboratorium. Studi lapangan mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalannya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu, di PT. Petrokimia Gresik. Studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal penelitian terbaru, dan situs industri yang mempelajari permasalahan analisa kegagalan pada *u-tube economizer boiler*. Sedangkan penelitian di laboratorium mengacu pada pengujian-pengujian yang akan mendukung dalam proses menganalisa. Pengujian yang dilakukan antara lain, uji komposisi, metallografi, uji kekerasan, dan uji fraktografi. Kesimpulan dari penelitian ini yaitu:

- 1 Faktor utama penyebab kegagalan *stress corrosion cracking* (SCC) pada *u-tube SA210-A1* adalah adanya

residual stress akibat proses *cold bending* dan persentase regangan melebihi standar yang telah ditentukan.

2. Mekanisme terjadinya SCC dipicu dengan adanya regangan yang besar membentuk *microcrack* di permukaan tube. Lapisan pelindung magnetite [Fe_3O_4] yang semula resistan terhadap korosi, tidak mampu lagi melindungi karena terjadinya penurunan pH. Sehingga *impurities* memasuki *crack* dan menyebabkan segregasi karbida. Selain itu, reaksi elektrokimia anatar Fe dan H_2O memicu perambatan *crack* hingga menembus diameter luar tube.

Berdasarkan wawancara dengan pembimbing lapangan di Pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik terdapat beberapa keganjalan penyebab kegagalan kerja dari economizer salah satunya, yaitu kebocoran pada *u-tube*. Pada gambar 1.2 menunjukkan kebocoran *u-tube* pada economizer. Rekomendasi yang di berikan oleh Gusti Umindya Tajjala ke pihak PT. Petrokimia gresik kurang sesuai karena pihak PT. Petrokimia gresik menanggapi bahwa kebocoran pada *u-tube* bukan karena *Stress corrosion cracking* (SCC) yang disebabkan adanya *residual stress* akibat proses *cold bending* dan persentase regangan melebihi standar namun Pihak PT. Petrokimia gresik menganggap bahwa pembendingan *u-tube* secara *hot working* dan material sudah memenuhi standar. maka dari itu pihak PT. Petrokimia gresik masih menginginkan permasalahan mengenai kebocoran pada *u-tube* untuk diteliti kembali untuk mencari penyebab lain yang mempengaruhi kebocoran pada *u-tube*.

Dari hasil wawancara dengan pembimbing lapangan di Pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik maka penelitian ini dilakukan kembali untuk mengetahui permasalahan yang terjadi dan memberikan rekomendasi yang sesuai untuk mempertahankan *life time* dari *economizer tube* B1102. Mengingat pentingnya peran boiler dalam menunjang produksi uap guna keperluan *utilities* dan *process train* pada PT. Petrokimia Gresik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan pada *u-tube economizer*?
2. Apa saja langkah-langkah perbaikan yang perlu dilakukan agar kebocoran pada *u-tube economizer* dapat diminimalisir?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa faktor-faktor penyebab kegagalan yang terjadi pada *u-tube economizer*
2. Menganalisa langkah-langkah perbaikan yang perlu dilakukan agar kebocoran pada *u-tube economizer* diminimalisir.

1.4 Batasan Masalah

Dengan melihat kompleksnya permasalahan yang ada, maka pembatasan masalah dilakukan sebagai berikut:

1. Analisa difokuskan pada *economizer tube*, khususnya *u-tube setion boiler B-1102*
2. Data dari lapangan, literature, dan informasi pekerja diperoleh selama pelaksanaan magang di PT Petrokimia Gresik. Untuk data kerusakan *economizer tube*, diambil dari hasil laporan kerusakan departemen pemeliharaan I TA dan Reliability.
3. Desain seluruh komponen boiler sudah memenuhi standar oprasional
4. Fluida yang mengalir di dalam tube dianggap homogen
5. Tekanan dan temperatur yang bekerja pada boiler tidak melebihi kemampuan material

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian tugas akhir ini dapat dijadikan saran kepada PT. Petrokimia Gresik adalah sebagai berikut:

1. Menentukan factor-faktor penyebab terjadinya kebocoran pada *u-tube economizer*
2. Masukan untuk langkah-langkah perawatan dan perbaikan agar kasus kegagalan serupa dapat diminimalisir

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisa laporan ini akan dibagi menjadi beberapa bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang dibuatnya penelitian ini, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaaf penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisikan tentang teori-teori yang berhubungan dan mendukung analisa permasalahan pada penelitian ini

BAB III METODOLOGI

Dalam bab ini dibahas tentang metode penelitian yang dipergunakan serta prosedur yang mencakup tahap persiapan dan pengambilan data penelitian yang dilakukan.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini penelitian membahas *historical record* dari boiler, Analisa Pengujian yang dilakukan antara lain: uji komposisi, metallografi, dan uji fraktografi, dan menentukan faktor-faktor penyebab kegagalan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

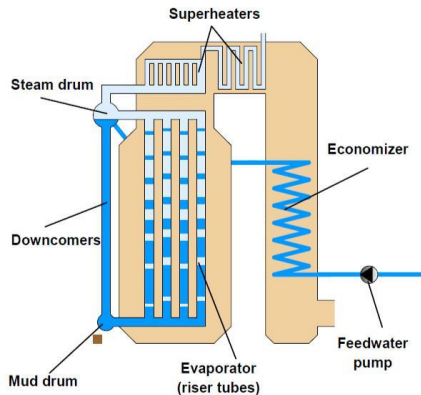
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 BOILER PIPA AIR (*WATER TUBE BOILER*)

Fungsi utama dari boiler adalah mengubah air menjadi uap panas (*superheated steam*) sebagai penggerak turbin. Proses yang terjadi di dalam boiler merupakan sebuah siklus tertutup dengan media utama air dan uap panas. [1]



Gambar 2.1 Sirkulasi air/uap pada boiler [2]

Berbeda dengan boiler pipa api (*fire tube boiler*), air/uap pada boiler pipa air yang dipanaskan mengalir di dalam tube dan mendapatkan panas dari gas buang (*flue gas*) hasil pembakaran eksternal. Sirkulasi ini dimulai ketika air dipompa dari tanki air-umpan (*feedwater tank*). Tekanan pada pompa *feedwater tank* harus mencapai tekanan yang dibutuhkan boiler. Pada kenyataannya, tekanan akhir uap harus di bawah 170 bar agar sirkulasi dapat berjalan dengan baik.

Pertama-tama, *feedwater* memasuki *economizer* dan dipanaskan hingga hampir mencapai titik didih air pada

tekanan tertentu. Untuk mencegah mendidihnya air, temperatur di dalam economizer dijaga agar tetap 10° di bawah titik didihnya.

Dari economizer, *feedwater* mengalir menuju tanki uap (*steam drum*). Di dalam *steam drum*, terjadi pencampuran dengan air yang berada di tanki uap untuk mengurangi tegangan akibat panas (*thermal stresses*).

Ketika telah mencapai titik jenuh (*saturated water*), air mengalir dari tanki uap melewati *downcomer tube* menuju *mud drum (header)*. Biasanya, di luar boiler terdapat sepasang *downcomer tubes* dingin.

Setelah itu, *saturated water* memasuki *riser tubes* dan sebagian mengalami penguapan. *Riser tube* diletakkan pada dinding boiler sebagai pendingin dinding tungku (*furnace*) agar efisien. *Riser tube* biasanya disebut *generating tubes* karena dapat menyerap panas secara efisien dalam pencampuran air/uap. *Riser tube* membentuk *evaporator unit* di dalam boiler.

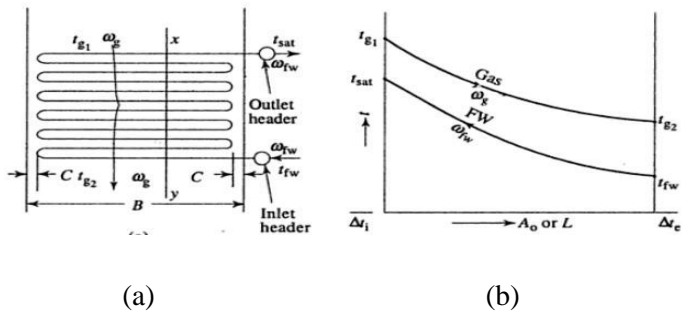
Setelah melewati *riser*, campuran air/uap kembali ke tanki uap. Di dalam tanki uap, terjadi pemisahan antara air dan uap; *saturated water* akan kembali *downcomer tubes* dan uap jenuh (*saturated steam*) akan menuju *superheater tube*. Tujuannya adalah untuk menghilangkan pengotor (*impurities*) di dalam *superheater tubes* dan turbin.

Di dalam *superheater*, uap akan dipanaskan hingga mencapai titik jenuh. Kemudian uap akan keluar menuju boiler. Sirkulasi air/uap pada boiler pipa air secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.1. [2]

2.2 ECONOMIZER

Economizer adalah komponen boiler yang berfungsi memanaskan air hingga hampir mencapai titik didihnya. *Economizer* menggunakan sisa gas buang yang berasal dari *superheating* atau *reheating* pada temperatur antara 370-540°C. Di dalam sebuah proses, membuang gas bertemperatur tinggi berarti membuang energi yang sangat banyak. Dengan menggunakan sisa gas buang untuk memanaskan *feedwater* inilah, efisiensi energi dan ekonomi dapat tercapai. Sehingga komponen ini dinamakan “*economizer*”.

Tube economizer biasanya memiliki diameter luar sebesar 45-70 mm dan disusun secara vertikal, yang setiap *tubenya* dihubungkan dengan *u-tube* (dipasang vertikal) sehingga *economizer* ini menghubungkan antara *inlet* dan *outlet headers*. Perakitan antara tube satu dengan yang lainnya berjarak sekitar 45-50 mm tergantung pada *tipe* bahan bakar dan karakteristik abu (*ash*). Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian *economizer* dan profil temperatur gas buang dan air panas (*water heated*) hingga mencapai temperatur jenuh.



Gambar 2. 2 (a) Economizer coil dan (b) profil temperatur gas buang dan Air [3]

2.3 ANALISA KEGAGALAN

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadinya permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan, dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa dijadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut.

Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industry, faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan:

Faktor kesalahan Pemilihan Material. Tabel 2.1 di bawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam masalah kegagalan material

Tabel 2. 1 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin [4]

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

Perawatan Komponen yang Kurang Baik. Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2. 2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin [4]

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

Kesalahan dalam Perancangan Komponen. Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
- Kegagalan getas akibat beban kejut
- Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
- *Static delayed fracture*
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
- Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

Kondisi Kerja yang Ekstrim. Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3 berikut ini:

Tabel 2. 3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin [4]

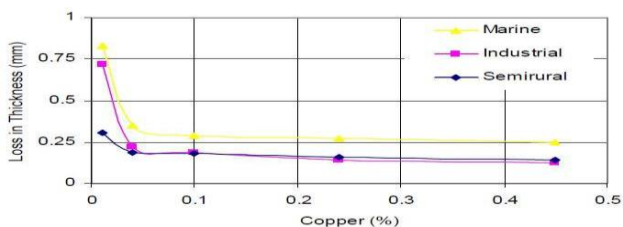
Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (fatigue)	25
Kegagalan getas (brittle fracture)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperatur tinggi	7
Korosi SCC, korosi lelah penggetasan hydrogen	6
Pemuluran	3
Abrasi, erosi	3

2.4 BAJA KARBON (*CARBON STEEL*)

Baja karbon sering digunakan sebagai elemen struktural yang efektif beberapa tahun terakhir ini di lingkungan non-korosif, jika memiliki paduan dan metode proteksi yang tepat. Namun, baja karbon ini merupakan logam yang rentan terhadap semua jenis korosi, pemeliharaan yang intensif sangat dibutuhkan apabila berada di lingkungan korosif.

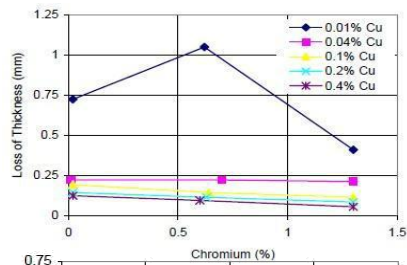
Baja karbon telah digunakan sebagai struktur di lingkungan non-air laut. Baja akan terkorosi dengan cepat saat pertama kali terkena udara dan segera membentuk lapisan oksida dimana lapisan ini akan mengurangi laju korosi secara signifikan

Untuk baja paduan, penambahan tembaga sebanyak 0,01 - 0,05% memiliki efek yang besar dalam meningkatkan ketahanan korosi, seperti yang terlihat pada Gambar 2.3. Sedangkan hubungan dengan unsur yang lain terhadap ketahanan korosi ditunjukkan Gambar 2.4. Sedikit penambahan kromium dapat meningkatkan kekuatan tensile secara signifikan dan ketahanan korosi. Kromium, nikel, dan tembaga memberikan sifat yang bagus tanpa harus menggunakan *coating* di lingkungan non-air laut.

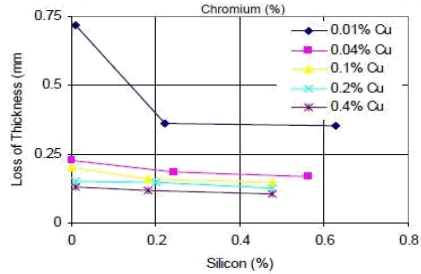


Gambar 2. 3 Efek penambahan tembaga terhadap uniform atmospheric corrosion pada baja [5]

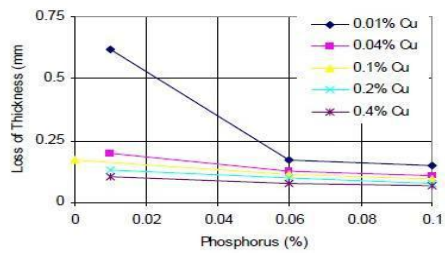
(a)

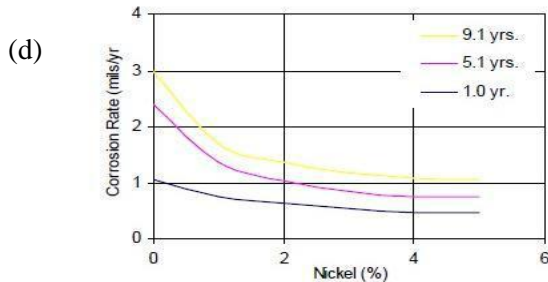


(b)



(c)





Gambar 2. 4 Efek penambahan unsur-unsur yang lain terhadap uniform Industrial atmospheric corrosion pada baja, (a) krom, (b)silikon, (c)fosfor, (d) nikel. [5]

Karbon berperan penting dalam pembentukan presipitasi karbida. Penurunan kadar karbon dapat membatasi pembentukan karbida yang berbahaya, seperti kromium karbida yang dapat mengendapkan kromium di batas butir.

Molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap serangan intergranular. Selain itu juga dapat meningkatkan resistansi terhadap korosi *pitting* dan *crevice*.

Kromium dapat meningkatkan ketahanan korosi. Titanium ditambahkan untuk memberikan stabilisasi dalam menghadapi presipitasi yang berbahaya, seperti kromium karbida. Unsur ini dikombinasikan dengan karbon dan nitrogen, dan tidak diperbolehkan membentuk karbida dan nitrida yang dapat memicu korosi intergranular. Temperatur optimal dalam pembentukan TiC (karbida titanium) adalah 900 – 950 °C. Silikon ditambahkan untuk meningkatkan resistansi korosi di lingkungan asam sulfur.

Sulfur dapat meningkatkan *machinability*, namun menurunkan resistansi terhadap korosi.

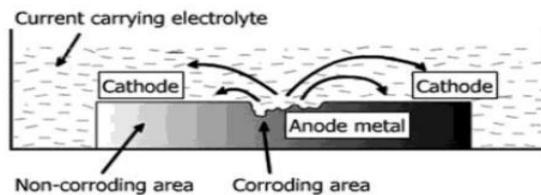
2.5 KOROSI

Korosi adalah reaksi yang terjadi antara material dan lingkungannya. Korosi tidak dapat terlepas dari pengaruh lingkungan. Semua lingkungan bersifat korosif untuk beberapa tingkatan. Berikut lingkungan yang korosif:

1. Udara dan kelembaban
2. Air bersih, penyaringan (*distilled*), garam, dan laut
3. Atmosfer pedesaan, perkotaan, laut, dan industri
4. Uap dan gas, seperti klorin
5. Ammonia
6. Hidrogen sulfid
7. Sulfur dioksida dan nitrogen oksida
8. Gas buang
9. Asam
10. Alkali
11. Tanah

Terbentuknya korosi bergantung pada empat hal berikut (sel korosi) yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6, yaitu

- Anoda
- Katoda
- Elektrolit
- Kontak metalik



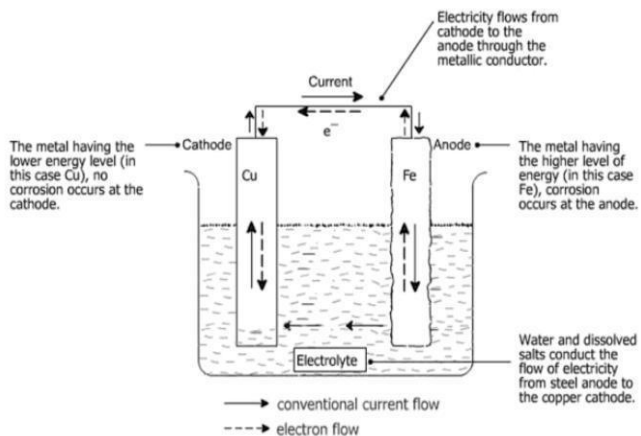
Gambar 2. 5 Sel korosi yang terjadi pada logam [6]

Anoda. Salah satu dari *dissimilar metal electrode* di dalam sel elektrolit, bertindak sebagai kutub negatif. Karena sebagai logam yang reaktif, elektron akan keluar dari anoda. Elektron tidak terlarut di dalam larutan aquos dan hanya mengalir menuju katoda.

Katoda. Elektroda yang memiliki kutub positif. Proses reduksi terjadi pada katoda. Elektron selalu menjadi agen pereduksi.

Elektrolit. Elektrolit merupakan larutan elektrik konduktif yang harus ada dalam pembentukan korosi. Air murni adalah salah satu elektrolit dengan konduktifitas yang rendah.

Kontak metalik. Kedua elektroda dihubungkan secara eksternal oleh konduktor logam (*metallic conductor*). Di dalam *metallic conductor*, arus akan mengalir dari kutub positif ke negatif, sedangkan elektron mengalir dari kutub negatif ke positif



Gambar 2. 6 Rangkaian sel korosi [6]

Anoda adalah area logam yang terkorosi. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi. Ini menggambarkan ion-ion logam masuk ke dalam larutan dengan cara *dissolution*, hidrasi atau pembentukan kompleks (*complex formation*). Reaksi anoda dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi oksidasi di sebagian besar logam dan paduan membentuk korosi. Jadi, korosi akan terhambat saat oksidasi dapat dihentikan.

Di katoda terjadi reaksi katodik (reaksi reduksi). melalui reaksi anodik, elektron akan melapisi permukaan katoda. Tidak seperti pada reaksi anodik, terjadi penurunan *valence state* pada reaksi katodik.

Electromotive force (emf) *series* adalah peringkat kereaktifitasan logam. Tabel 2.4 menunjukkan *electromotive force series* untuk logam. Logam paling mulia berada pada peringkat atas dan memiliki potensial standard paling positif. Logam paling aktif berada pada peringkat paling bawah dan memiliki potensial standard paling negatif. Potensial untuk hidrogen bernilai nol sesuai kesepakatan internasional. Semua potensial elektroda standard mengacu pada nilai *standard hydrogen electrode* (SHE).

Tabel 2. 4 Electromotive force series [7]

Reaksi elektroda	Standard potensial at
	25 °C (77 °F), V.SHE
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	1,50
$\text{Pd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pd}$	0,987
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Hg}$	0,854

$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	0,800
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg}$	0,789
$\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$	0,521
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	0,337
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000 (<i>Reference</i>)
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
$\text{Ti}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Ti}$	-0,336
$\text{In}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{In}$	-0,342
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
$\text{Ga}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,53
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,91

Logam paling atas lebih tahan terhadap korosi dan cenderung menjadi daerah oksidasi. Kemampuan oksidasi di dalam larutan harus lebih besar daripada logam aktif, sebagai contoh natrium, magnesium, dan aluminium. Potensial oksidasi yang tinggi dibutuhkan untuk mengkorosikan besi dan nikel. Potensial yang lebih tinggi lagi dibutuhkan untuk mengkorosikan tembaga, dan potensial yang sangat tinggi lagi digunakan untuk mengkorosikan platina dan emas. Sehingga, reaktifitas logam sangat berperan penting dalam pembentukan korosi.

2.6 FAKTOR-FAKTOR MEDIA AIR YANG BERPENGARUH TERHADAP LAJU KOROSI

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap laju korosi di lingkungan air adalah komposisi, pH, temperatur, kecepatan, dan organisme biologi. Lingkungan air sendiri dibagi menjadi dua, yaitu air tawar dan air laut.

2.6.1 Komposisi Air

Perbedaan komposisi air bergantung pada bahan dan kontaminan yang dibawa oleh hujan/ tanah di sekitarnya dan polutan yang dibuang ke saluran air. Senyawa-senyawa korosif yang paling berpengaruh secara umum adalah gas dan garam terlarut, serta beberapa senyawa tambahan yang didapat dari polutan.

Gas terlarut yang mempengaruhi korosifitas di perairan adalah oksigen dan belerang. Oksigen adalah senyawa yang sering dijumpai, karena dapat meningkatkan laju korosi hampir di semua logam. Konsentrasi oksigen terbesar terdapat pada permukaan air dan algae.

Sedangkan ion-ion dari garam terlarut yang dapat meningkatkan korosifitas adalah klorida dan sulfat. Ion-ion ini akan bereaksi dengan kation logam membentuk korosi. Sedangkan kalsium dan magnesium menentukan kesadahan air. Tabel 2.5 memperlihatkan komposisi dan Tabel 2.6 memperlihatkan karakteristik perairan alami (*natural water*) secara umum. Pengukuran resistifitas elektrik air memberikan indikasi umum terhadap korosifitas.

Tabel 2. 5 Anion dan Kation yang terdapat di perairan alami

KATION	ANION
Na ⁺	SO ₄ ²⁻
Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻
K ⁺	Cl ⁻
Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻

Tabel 2. 6 Analisa tipe-tipe perairan alami [6]

DESKRIPSI	A	B	C	D	E	F	G
Kadar pH	6,3	6,8	7,4	7,5	7,1	8,3	7,1
Klorida (ppm)	5	11	24	21	4	94	149
Sulfat (ppm)	6	20	39	50	17	109	463

A = *very soft like water*

B = *moderately soft surface water*

C = *slightly hard river water*

D = *moderately hard river water*

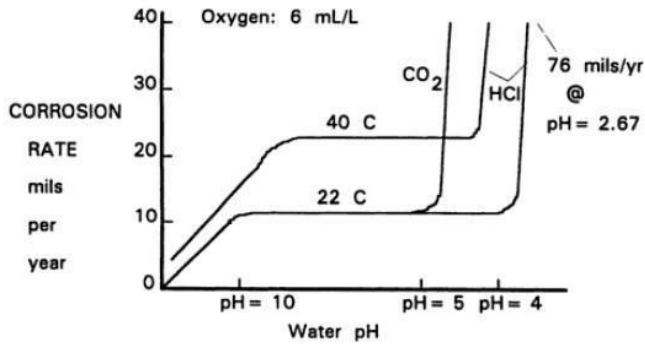
E = *hard borehole water*

F = *slightly hard brohole water with bicarbonate ions*

G = *very hard groundwater*

2.6.2 Nilai pH

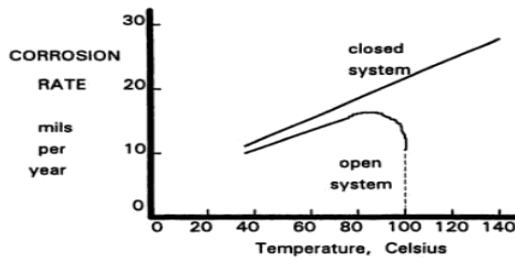
Nilai pH baik di perairan alami maupun air laut berkisar 4,5 – 8,5. Berikut pengaruh pH terhadap laju korosi pada baja karbon yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Pengaruh pH terhadap korosi baja karbon [7]

2.6.3 Temperatur

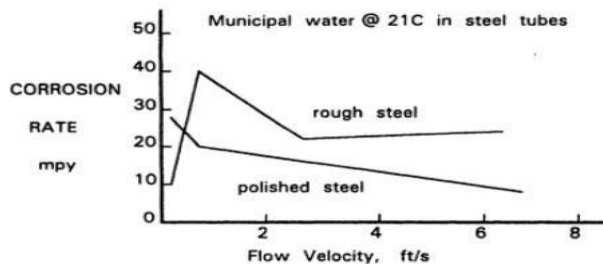
Sama halnya di daratan, temperatur tinggi akan meningkatkan laju korosi. Meningkatnya temperatur akan menurunkan tingkat kelarutan oksigen di dalam air, seperti pada Gambar 2.7 dan 2.8.



Gambar 2. 8 Pengaruh temperatur pada korosi besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut (*oxygen dissolved*) [7]

2.6.4 Kecepatan dan Agitasi Air

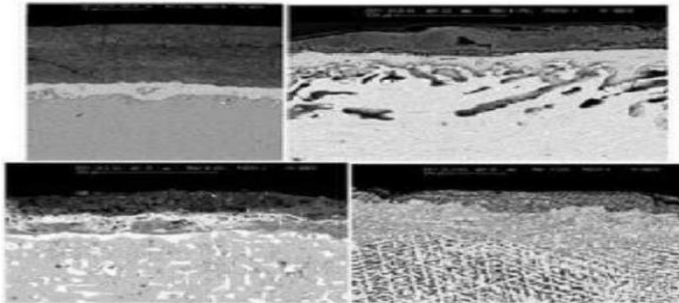
Kecepatan dan agitasi air akan meningkatkan atau menurunkan laju korosi bergantung pada jenis logam. Sebagian besar logam memiliki batas kecepatan aliran air sehingga korosi akan muncul secara signifikan. Pada Gambar 2.9 memperlihatkan pengaruh kecepatan aliran air terhadap korosi pada baja.



Gambar 2. 9 Pengaruh kecepatan aliran air pada korosi baja. Pada awalnya, peningkatan oksigen akan meningkatkan korosi, Kemudian terjadi passivasi oksigen yang menurunkan korosin [8]

2.7 KOROSI INTERGRANULAR

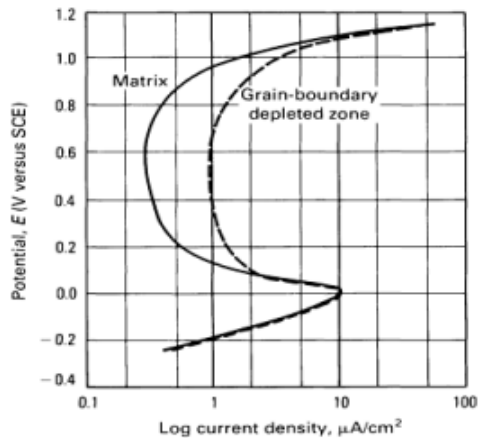
Korosi intergranular adalah bentuk korosi yang terjadi pada paduan logam akibat terjadinya reaksi antar unsur logam di batas butirnya. Seperti yang terjadi pada baja tahan karat *austenitic* apabila diberi perlakuan panas. Contoh dari korosi intergranular ditunjukkan pada Gambar 2.10



Gambar 2. 10 Korosi Intergranular [9]

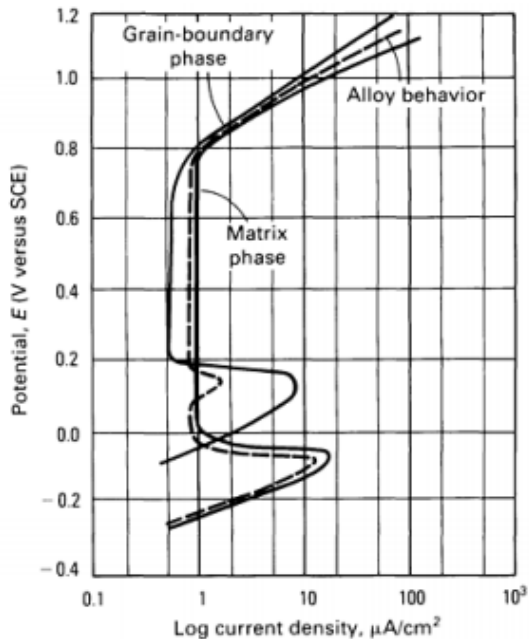
1. Mekanisme dan teori

Korosi intergranular terjadi ketika tingkat korosi pada daerah batas butir dari paduan melebihi dari interior butir. Perbedaan tingkat korosi ini umumnya merupakan hasil perbedaan komposisi antara batas butir dan interior. Perbedaan tingkat korosi dapat disebabkan oleh sejumlah reaksi. Suatu fasa dapat mengendap pada batas butir dan menguras matriks elemen yang mempengaruhi ketahanan korosinya. Fase batas butir mungkin lebih reaktif daripada matriks. Berbagai atom zat terlarut dapat memisahkan batas butir dan mempercepat korosi di tempat. Perubahan metalurgi yang menyebabkan korosi intergranular tidak selalu terlihat pada mikrostruktur; Oleh karena itu, tes korosi kadang-kadang merupakan indikasi perubahan metalurgi yang paling sensitive. Gambar 2.11 menggambarkan elektrokimia korosi intergranular. Kurva polarisasi ditunjukkan untuk daerah batas butir dan matriks. Sistem yang dipilih adalah salah satu yang menunjukkan perilaku pasif aktif, misalnya besi kromium-nikel, stainless steel dalam asam sulfat (H_2SO_4). Beberapa poin harus diperhatikan. Perbedaan tingkat korosi bervariasi dengan potensial. Harga mendekati atau sama pada rentang aktif dan transpassive dan sangat bervariasi dengan potensi di rentang pasif.



Gambar 2. 11 Perilaku polarisasi anodik dari paduan aktif-pasif dengan batas butir habis zona (skematis) [9]

Korosi intergranular biasanya bukan hasil batas butir aktif dan matriks pasif. Permukaan yang berkarat adalah satu potensi. Perbedaan komposisi menghasilkan tingkat korosi yang berbeda pada potensi yang sama di wilayah pasif. Bila lebih dari satu fasa metalik hadir dalam paduan, perilaku polarisasinya akan menjadi jumlah rata-rata volume dari perilaku setiap fase (Gambar 2.12) Permukaan aktif-pasif dimungkinkan dalam kasus ini.



Gambar 2. 12 Perilaku polarisasi anodik dari paduan aktif-pasif dua fasa (skematik) [9]

2. Korosi Intergranular dan Bentuk Korosi Lainnya

Kerentanan terhadap korosi intergranular tidak dapat dianggap sebagai indikasi umum meningkatnya kerentanan terhadap bentuk korosi lainnya, seperti pitting atau korosi umum. Lingkungan yang menyebabkan korosi intergranular untuk sistem paduan tertentu seringkali sangat spesifik. Kerentanan terhadap korosi intergranular dapat menyebabkan kerentanan terhadap retak korosi tegangan intergranular, namun beberapa paduan nikel-base adalah sebenarnya lebih tahan terhadap stress-corrosion cracking (SCC) saat mereka peka terhadap korosi intergranular. [9]

2.8 KOROSI PITTING

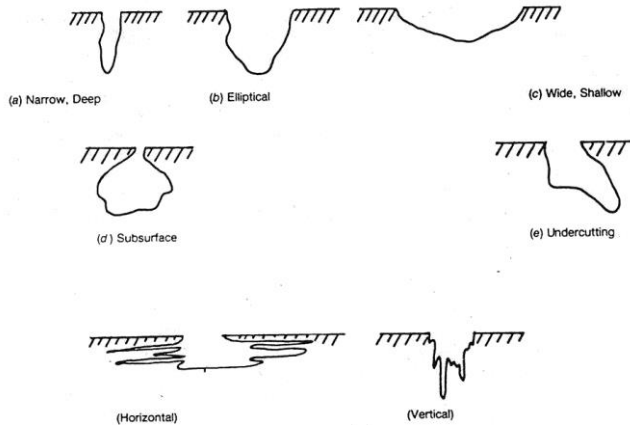
Pitting corrosion adalah bentuk korosi lokal, dimana produk korosinya cenderung membentuk lubang, sehingga disebut juga korosi sumuran. Lubang/pit tersebut biasanya memiliki diameter yang bervariasi, dari kecil ke besar, tetapi pada umumnya lubang tersebut berdiameter kecil. *Pitting* adalah salah satu bentuk korosi yang paling merusak. Presentase hilang berat yang sedikit dan sulitnya mendeteksi adanya pit yang sering tertutup oleh produk korosi memungkinkan peralatan mengalami kegagalan tanpa terduga. Faktor-faktor yang berhubungan dengan korosi sumuran akan dibahas sebagai berikut.

- Bentuk Sumur (Pit) dan Pertumbuhannya

Pit biasanya tumbuh searah dengan arah gravitasi ke arah bawah dari permukaan horisontal. Sejumlah kecil pit berawal pada permukaan vertikal dan sangat jarang ditemui pit yang tumbuh ke atas dari permukaan bawah horisontal. *Pitting* dapat dianggap sebagai tahap pertengahan antara *general corrosion* dan material awal tanpa korosi. Dapat juga dikatakan bahwa korosi sumuran sebagai periode perantara terjadinya korosi merata. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 2.13. Spesimen A merupakan keadaan awal. Spesimen C menunjukkan logam yang mengalami kerusakan akibat korosi merata. Sedangkan pada spesimen B *pitting* terjadi sampai titik yang sejajar dengan korosi merata pada spesimen C. Bentuk-bentuk korosi sumuran dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2. 13 Contoh dari deep pits (a) dan shallow pits (b) [10]



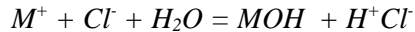
Gambar 2. 14 Berbagai Bentuk Korosi Sumuran [10]

- Mekanisme *Pitting Corrosion*

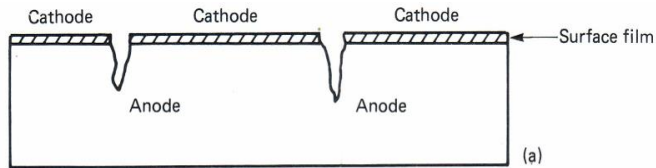
Pitting corrosion terjadi akibat kegagalan lapisan pasif pada permukaan logam. Jenis korosi ini sering melibatkan ion halida (seperti ion *chloride*) karena mempunyai kecenderungan yang besar untuk merusak lapisan pasif pada permukaan logam. *Pitting corrosion* terjadi pada daerah tertentu dari permukaan logam akibat adanya sistem anoda pada logam, dimana pada daerah tersebut kecenderungan terjadi reaksi oksidasi lebih besar daripada bagian lain. *Pitting* dalam pertumbuhannya membutuhkan periode awal sebelum terlihat secara visual. Kemudian pelarutan logam akan terjadi dalam *pitting* dengan laju yang tetap atau bahkan meningkat. Korosi jenis ini sangat berbahaya karena pada bagian permukaan hanya berupa lubang kecil, sedangkan pada bagian dalamnya terjadi proses korosi membentuk “sumur” yang tidak tampak.

Karena suatu pengaruh fisik maupun metalurgi (adanya presipitasi karbida maupun inklusi) maka pada permukaan logam terdapat daerah yang terkorosi lebih cepat dibandingkan

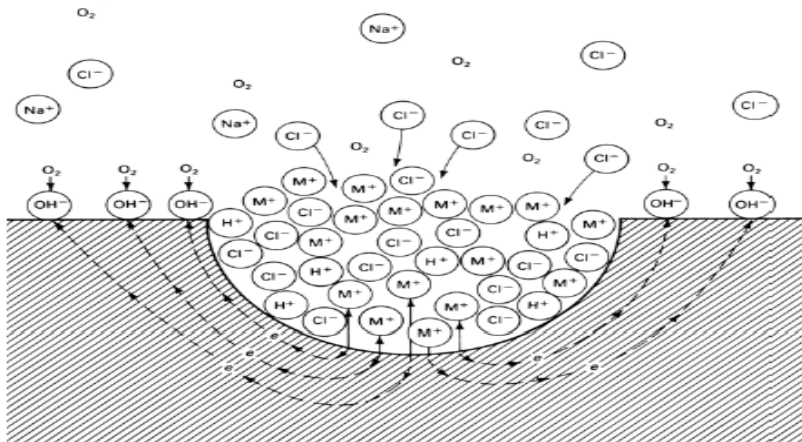
lainnya. Kondisi ini menimbulkan *pitting* yang kecil, pelarutan logam yang cepat terjadi dalam *pitting*, saat reduksi oksigen terjadi pada permukaan yang rata. Pelarutan logam yang cepat akan mengakibatkan pindahnya ion Cl^- pada daerah ini. Kemudian di dalam *pitting* terjadi proses hidrolisis yang menghasilkan ion H^+ dan Cl^- .



Kedua jenis ion ini secara bersama-sama meningkatkan terjadinya pelarutan logam sehingga mempercepat terjadinya korosi. Reaksi ini disebut *autocatalytic reaction* karena reaksi pelarutan logam berlangsung berulang dengan terbentuknya *hydrochloride* (HCl).



Gambar 2. 15 Permukaan Anoda yang Sempit dan Katoda yang Luas [10]



Gambar 2. 16 Mekanisme Korosi Sumuran [10]

Daerah permukaan logam cenderung untuk menekan laju korosinya atau menjadi katodik. Dengan turunnya pH pada *pitting* akibat terbentuknya HCl, secara katodik bagian lain dari permukaan logam akan terlindungi. Korosi sumuran memiliki kecenderungan terjadi di bawah permukaan, sehingga mengakibatkan kerusakan yang lebih hebat dibandingkan dengan di permukaan.

- Kecepatan

Pitting biasanya dihubungkan dengan kondisi stagnan seperti sebuah *tube* yang di dalamnya terdapat liquid yang diam. Namun, kecepatan yang semakin meningkat akan cenderung menurunkan laju serangan *pitting*. Pada kecepatan yang tinggi, kedalaman pit yang dihasilkan relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan yang lebih rendah.

- Variabel Metallurgy

Pada umumnya *low carbon* lebih rentan terserang *pitting corrosion* daripada logam atau paduan yang lain, terutama jika berada pada daerah temperatur tinggi karena ketahanannya terhadap *pitting corrosion* akan menurun.

2.10 MACAM- MACAM KEGAGALAN ECONOMIZER AKIBAT KOROSI

2.10.1 Kegagalan Economizer Akibat Low pH corrosion during service

Tabel 2. 7 Kasus Low pH corrosion during service di industri kimia [11]

Industry:	Chemical process
Specimen Location:	Economizer
Specimen Orientation:	Horizontal
Years in Service:	7
Water-Treatment Program:	Chelant
Drum Pressure:	155 psi (1.1 MPa)
Tube Specifications:	2½ in. (6.0 cm) outer diameter

Korosi adalah masalah berulang pada economizer boiler berbahan bakar gas ini. Kegagalan terjadi hanya pada akhir panas economizer di awal daerah bersirip (Gambar 2.17). Fluks panas di daerah ini 40% lebih tinggi dari nilai desain. Korosi membentuk gouge berbentuk elips besar yang ditutupi lapisan oksida besi gelap dan tebal yang tidak beraturan. Pemeriksaan mikrostruktur oksida besi yang tertutup menunjukkan adanya struktur laminasi yang khas dari low pH gouging.



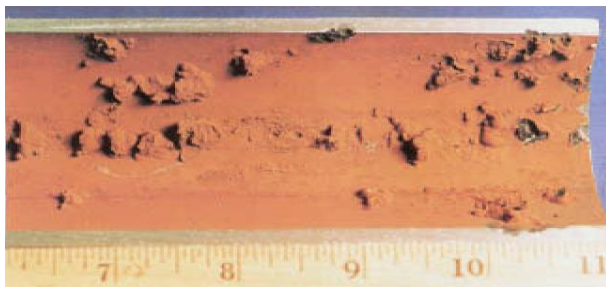
Gambar 2. 17 Gouging di sepanjang permukaan dalam sirip berlawanan [11]

2.10.2 Kegagalan Economizer Akibat *Oxygen corrosion*

Tabel 2. 8 Spesifikasi Economizer Kasus Oxygen Corrosion Di Industri Kimia [11]

Industry:	Chemical process
Specimen Location:	Economizer
Specimen Orientation:	Horizontal
Years in Service:	7
Water-Treatment Program:	Polymer and oxygen scavenger
Drum Pressure:	600 psi (4.1 MPa)
Tube Specifications:	2½ in. (6.3 cm) outer diameter

Warna kemerahan oksida besi dan adanya tuberkel yang menutup lubang yang mengandung oksida besi (Gambar 2.18) khas dari paparan baja economizer terhadap air yang mengandung kadar oksigen terlarut yang terlalu tinggi. Pitting dan perforasi tabung economizer merupakan masalah berulang pada plant ini. Kegagalan terjadi setiap 3 atau 4 bulan



Gambar 2. 18 Kapsul oksida besi yang menutupi lokasi pit [11]

Kandungan oksigen air diukur pada 5 sampai 9 ppb. Kunjungan ke tingkat yang lebih tinggi dicurigai namun tidak dapat didokumentasikan Boiler dioperasikan terus menerus.

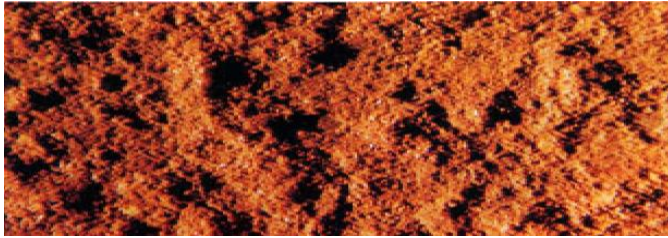
meskipun sumber oksigen tidak teridentifikasi, jelas bahwa tingkat tinggi secara berlebihan ada di daerah yang terkena economizer.

2.10.3 Kegagalan Economizer Akibat Cold-end corrosion during service

Tabel 2. 9 Spesifikasi Economizer Kasus Cold-end Corrosion During Service Di Indutri Kertas [11]

Industry:	Pulp and paper
Specimen Location:	Economizer, recovery boiler
Specimen Orientation:	Vertical
Years in Service:	20
Drum Pressure:	600 psi (4.1 MPa)
Tube Specifications:	2½-in. (6.3 cm) outer diameter
Fuel:	Black liquor

Gambar 2.19 adalah foto close-up permukaan eksternal tube economizer yang mengalami korosi umum. Perhatikan kontur bopeng. Korosi terjadi di daerah economizer dimana asam sulfat terkondensasi dari gas buang. Kondensasi seperti itu, jika terjadi, umumnya mempengaruhi tube pada akhir economizer dimana air umpan masuk - yaitu, akhir dimana suhu logam rendah.



Gambar 2. 19 Kontur macet dari tube economizer yang terpapar asam sulfat kental. (Pembesaran: 7,5 X.) [11]

Tabel 2. 10 Spesifikasi Economizer Kasus Cold-End Corrosion During Service Di Industri Gula [11]

Industry:	Sugar
Specimen Location:	Economizer
Specimen Orientation:	Horizontal
Tube Specifications:	1½ in. (4.8 cm) outer diameter
Fuel:	No. 6 fuel oil (1.9% S)

Korosi dan perforasi yang terlihat pada Gambar 2.20 merupakan masalah kronis pada boiler ini. Permukaan luar, termasuk permukaan sirip, permukaan halus, kehilangan logam secara umum. Dalam banyak kasus, korosi parah di sepanjang garis pelekatan telah menyebabkan sirip terpisah dari dinding tube.

Endapan dan produk korosi yang menutupi permukaan yang terkorosi dianalisis dengan difraksi X-ray dan diidentifikasi sebagai sulfat besi terhidrasi. Kadar pH bubur 1% dari material yang telah diukur. Korosi disebabkan oleh kondensasi asam sulfat pada permukaan tube dingin selama operasi boiler.



Gambar 2. 20 Korosi dan perforasi tabung economizer bersirip yang dihasilkan dari paparan asam sulfat kental. Perhatikan detasemen sirip dari dinding tube [11]

2.10.4 Kegagalan Economizer Akibat Dew - point corrosion during idle periode

Tabel 2. 11 Spesifikasi Economizer Kasus Dew - Point Corrosion During Idle Periode Di Industri Kertas [11]

Industry:	Pulp and paper
Specimen Location:	Front row of economizer, recovery boiler
Specimen Orientation:	Bend, slanted
Years in Service:	11
Drum Pressure:	600 psi (4.1 MPa)
Tube Specifications:	2 in. (5.1 cm) outer diameter
Fuel:	Black liquor

Tube economizer yang ditunjukkan pada Gambar 2.21 memiliki kontur permukaan yang tidak beraturan dan pebblelike yang dilapisi dengan produk korosi dan endapan nonprotektif. Munculnya permukaan ini adalah karakteristik korosi yang terjadi selama periode idle ketika garam penghasil asam bergabung dengan kelembaban atmosfer untuk menghasilkan lingkungan yang korosif.



Gambar 2. 21 Permukaan eksternal tube economizer mengikuti titik embun korosi [11]

2.10.5 Kegagalan Economizer Akibat *Stress corrosion cracking*

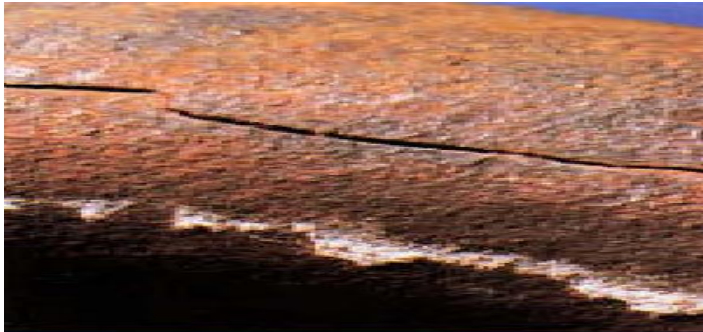
Tabel 2. 12 Spesifikasi Economizer Kasus Stress Corrosion Cracking Di Industri Kertas [11]

Industry:	Pulp and paper
Specimen Location:	Economizer
Specimen Orientation:	Bend
Years in Service:	15
Water-Treatment Program:	Phosphate
Drum Pressure:	800 psi (5.5 MPa)
Tube Specifications:	2 in. (5.1 cm) outer diameter

Bagian dari *u-tube economizer* yang memiliki tikungan 90° pada titik tengahnya berisi sepasang celah ber dinding tebal di sisi berlawanan tabung (Gambar 2.22). Tabung itu berbentuk oval dan bukan melintang melingkar melalui tikungan, dan celah-celah itu terletak di ujung yang berlawanan dari sumbu panjang oval. Permukaan internal mengalami pendangkalan, kehilangan logam umum. Kristal berkilau dari magnetit hitam dikaitkan dengan korosi ini.

Pemeriksaan mikrostruktur mengungkapkan bahwa retak berasal dari dasar lubang dangkal. Retakan itu dipantulkan bercabang saat disebarkan melalui dinding tube. Jalur retak pada dasarnya melintasi butiran logam (transgranular).

Stress corrosion cracking pada baja karbon memerlukan tindakan gabungan dari sodium hidroksida terkonsentrasi dan tegangan tarik. Natrium hidroksida ternyata terkonsentrasi di bawah deposit besi oksida berpori yang ada di permukaan internal. Adanya magnetit kristal menunjukkan adanya paparan natrium hidroksida pekat. Lubang dangkal bertindak sebagai konsentrator tegangan, menaikkan tingkat stres normal. Selain itu, tekanan dari tekanan internal akan tertinggi sepanjang ujung sempit penampang oval, di mana retak terbentuk. Orientasi longitudinal retak menunjukkan bahwa tekanan internal memberikan tekanan yang diperlukan untuk retak korosi tegangan.



Gambar 2. 22 Tebal longitudinal sepanjang sisi tikungan 90° dalam *u-tube economizer*. Sebuah celah yang sama terletak di sisi yang berlawanan. [11]

2.10.6 Kegagalan Economizer Akibat *Erosi corrosion*

Tabel 2. 13 Spesifikasi Economizer Kasus Erosi corrosion di industri kertas [11]

Industry:	Pulp and paper
Specimen Location:	Economizer
Specimen Orientation:	Curved, predominantly vertical
Years in Service:	8
Water-Treatment Program:	Phosphate
Drum Pressure:	1200 psi (8.3 MPa)
Tube Specifications:	2 in. (5.1 cm) outer diameter, mild steel
Fuel:	Black liquor

Penipisan substansial permukaan luar dinding tabung ada pada kelengkungan bagian dalam tikungan pada tube economizer. Sebuah ruptur compang-camping melubangi dinding di zona penipisan parah (Gambar 2.23). Jauh dari pecahnya, permukaannya relatif tidak tergoayahkan.

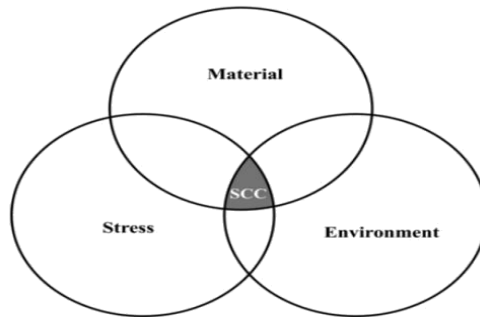
Perpecahan ini disebabkan oleh dinding erosi yang menipis. Tekanan internal normal tidak bisa lagi terkandung di lokasi yang terkikis dan tabungnya pecah. Erosi disebabkan oleh pelampiasan partikulat keras yang masuk dalam gas buang. Ada bukti adanya korosi cold-end ringan pada semua permukaan luar.



Gambar 2.23 Pecahnya tube economizer yang disebabkan oleh erosi permukaan luar lokal yang parah terkait dengan bahan partikulat yang dimasukkan ke dalam gas buang [11]

2.11 STRESS CORROSION CRACKING

Stress corrosion cracking (SCC) adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan kegagalan material yang perambatan retak-nya (*crack propagation*) dipicu oleh lingkungan. *Crack propagation* yang terjadi merupakan interaksi antara tegangan mekanik dan reaksi korosi. Untuk material tertentu, keberadaan SCC bergantung pada lingkungan yang agresif dan tegangan (*stress*), khususnya tegangan tensile. Banyak macam-macam faktor yang dapat memicu SCC seperti, aspek metalurgi dari baja (komposisi kimia, grade, mikrostruktur, perlakuan panas, unsur paduan, unsur pengotor, dan pengelasan), parameter lingkungan (unsur tanah, konduktifitas, siklus musim *dry-wet*, temperatur, kelembaban, CO₂, dan kondisinya, dan mikroorganisme), *coatings* dan CP (*tipe*, sifat, mode kegagalan, kesesuaian coating dengan CP, dan potensial/arus CP), kondisi *stressing* (tekanan, fluktuasi tekanan, tegangan sisa, *longitudinal stress*, dan konsentrasi *local stress-strain*), dan reaksi korosi (pit korosi, ukuran pit, hidrogen, passifasi, dan pembentukan lapisan pasif, *active dissolution*, transport massa). Secara garis besar, SCC disebabkan oleh tiga faktor yang ditunjukkan pada Gambar 2.24, yaitu material, lingkungan, dan *tensile stress*.



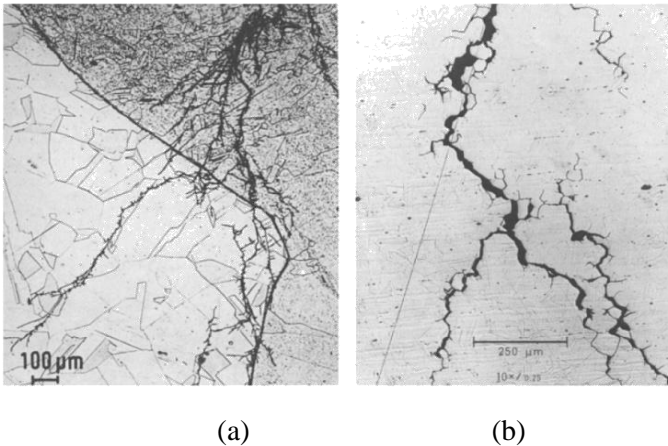
Gambar 2. 24 Tiga faktor utama penyebab stress corrosion cracking (SCC) [12]

Tegangan yang menyebabkan SCC berasal dari tegangan sisa (*residual stress*) hasil proses manufaktur seperti pengelasan atau *bending*. Terjadinya SCC hanya membutuhkan *stress* yang relatif kecil, biasanya di bawah *macroscopic yield strength* logam. Bagaimanapun, konsentrasi tegangan akan meningkat secara lokal sejak adanya inisiasi *crack* di permukaan yang sudah ada atau baru terbentuk akibat korosi, operasi, atau proses lainnya.

Lingkungan yang menyebabkan SCC biasanya *aqueous* dan yang dapat mengkonsolidasi lapisan dengan *moisture* atau *bulk solution*. *Cracking* terjadi secara tidak normal ketika laju korosi meningkat secara signifikan, menginisiasi *stress corrosion crack*, dan akhirnya menjalar ditambah dengan adanya reaksi korosi. Secara umum, SCC terjadi ketika interaksi antara logam dan lingkungan merusak lapisan pasif pada permukaan logam.

Ada dua *tipe* SCC pada logam, yaitu intergranular dan transgranular. *Intergranular crack* tumbuh mengikuti batas

butir, sedangkan *transgranular crack* tumbuh memotong batas butir yang ditunjukkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2. 25 Branching crack pada SCC, (a) transgranular dan (b) intergranular [13]

SCC merupakan proses yang tidak bisa dihindari. Tapi, tidak semua interaksi antara logam dan lingkungannya menimbulkan SCC. Ada persyaratan khusus terkait hubungan logam dan lingkungan agar terjadi SCC. Salah satunya adalah karbon di lingkungan passivasi.

Karbon dan baja karbon di lingkungan yang membentuk lapisan pasif atau lapisan oksida dapat mengalami SCC, termasuk di lingkungan *caustic solutions*, fosfat, nitrat, karbonat, dan air dengan temperatur tinggi

Komposisi paduan, mikrostruktur, perlakuan panas, dan segregasi batas butir memengaruhi perilaku SCC pada logam. Biasanya *stress corrosion crack* terbentuk akibat *metallurgical defect*, yang nantinya juga akan memengaruhi mekanisme dan

kinetik perambatan retak (*propagation crack*). Berikut beberapa aspek metalurgi yang memengaruhi SCC:

1. Pengaruh kekuatan material

Sebenarnya, ada beberapa aturan umum yang mengatur pengaruh kekuatan material terhadap SCC. Sebagai contoh pada *hydrogen embrittlement*, material dengan kekuatan tinggi akan semakin rentan. Namun, SCC juga mudah terjadi pada *lower-strength material* jika *plastic strain* pada ujung retak (*crack tip*) sudah terbentuk.

2. Pengaruh komposisi paduan

Perbedaan yang sangat kecil terhadap komposisi paduan dapat memengaruhi perilaku SCC. Penambahan paduan tidak selalu sama di tiap lingkungan. Sebagai contoh, kadar molibdenum yang tinggi meningkatkan resistansi *low-alloy steel* terhadap SCC di lingkungan karbonate-bikarbonate, tetapi lebih rentan terhadap *caustic cracking*].

3. Pengaruh perlakuan panas

Perbedaan perlakuan panas dapat memengaruhi sensitifitas material, mode kegagalan, bahkan mekanisme kegagalan SCC. *Austenitic stainless steel* akan mengalami transgranular SCC di lingkungan klorida.

4. Segregasi batas butir (*grain boundary segregation*)

Segregasi karbon dan/atau nitrogen di batas butir berpengaruh dalam pembentukan SCC baja karbon. Kira-kira dibutuhkan 0,1% karbon agar SCC dapat terjadi di lingkungan nitrat atau *caustic*. Sebenarnya, *impurities* pada batas butir juga menimbulkan intergranular SCC pada *iron-based alloy*, *austenitic stainless steel*, dan *nickel-based alloy*. Besarnya bergantung pada potensial elektrokimia, korosifitas,

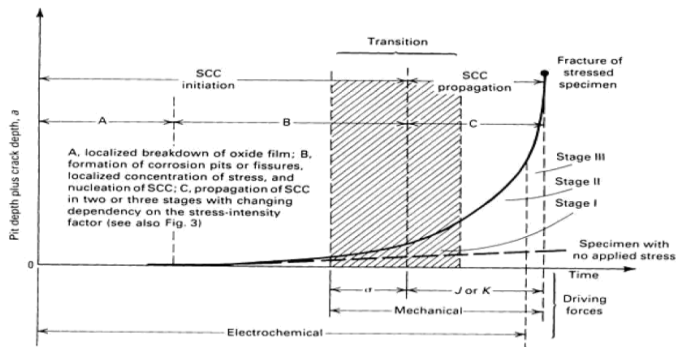
lingkungan, dan *tipe*, bentuk, dan konsentrasi *impurities* pada batas butir. Meskipun unsur substitusional di batas butir sangat memengaruhi SCC baja, hal ini tidak serta-merta terjadi di semua potensial atau lingkungan. Sebagai contoh, segregasi fosfor membentuk intergranular SCC pada *low-alloy steel* di lingkungan *caustic* atau air dengan potensial oksida. Namun, dengan potensial rendah, fosfor tidak menyebabkan SCC di lingkungan *caustic* dan sedikit berpengaruh di lingkungan karbonat-bikarbonat. [14]

Berikut Tabel 2.14 yang menunjukkan hubungan antara baja karbon dan lingkungan yang rentan menimbulkan SCC.

Tabel 2. 14 Lingkungan-Baja karbon yang menimbulkan SCC [4]

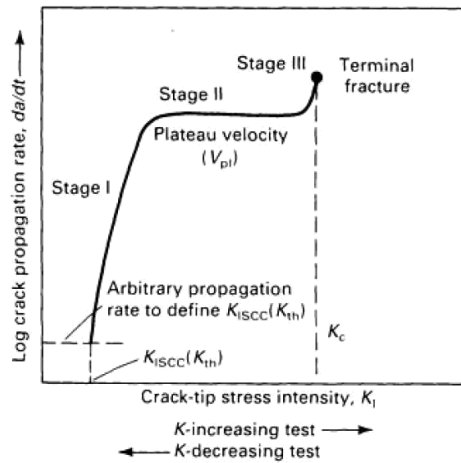
LINGKUNGAN	BAJA KARBON
Amina, <i>aqueous</i>	√
Ammonia, <i>anhydrous</i>	√
Ammonia, <i>aqueous</i>	-
Bromida	-
Karbonat, <i>aqueous</i>	√
Karbon monoksida, karbon dioksida, campuran air	√
Klorida, <i>aqueous</i> , mendidih	-
Klorida, kering, panas	-
Pelarut klorinasi	-
Sianida, <i>aqueous</i> , <i>acidified</i>	-
Fluorida, <i>aqueous</i>	√
Asam hidroklorit	-
Asam hidroflorin	-

Mekanisme terjadinya SCC telah banyak dipelajari, namun, masih belum ada model yang pasti, salah satunya diperlihatkan pada ilustrasi Gambar 2.28. Terdapat *gradual transition* dari *localized corrosion* untuk menginisiasi *crack* dan tumbuh tanpa tahapan pemisahan, atau terdapat inisiasi atau pertumbuhan *crack* yang pendek namun terus berulang. Di beberapa kejadian, dari sudut pandang *engineer*, hipotesis ini sesuai bahwa mekanisme terdiri dari dua tahap: inisiasi dan perambatan.



Gambar 2. 26 Pengaruh faktor elektrokimia dan mekanik relatif terhadap terjadinya korosi dan SCC [15]

Gambar 2.26 mengindikasikan adanya perubahan mekanisme SCC. *Stress* yang diabaikan pada awalnya akan menjadi dominan dalam mempengaruhi *cracking*. Lingkungan akan selalu terlibat, meskipun hanya berpengaruh di awal saja. Adanya cacat mekanik atau *crack* pada logam yang sudah memiliki *stress* mengubah tahap inisiasi menjadi perambatan. Kemudian, kegagalan secara mekanik terjadi berdasarkan *stress intensity factor* (J untuk *elastic-plastic fracture mechanics*; K untuk *linear elastic fracture mechanics*) sebagai *driving force* untuk perambatan retak SCC yang diilustrasikan pada Gambar 2.27.



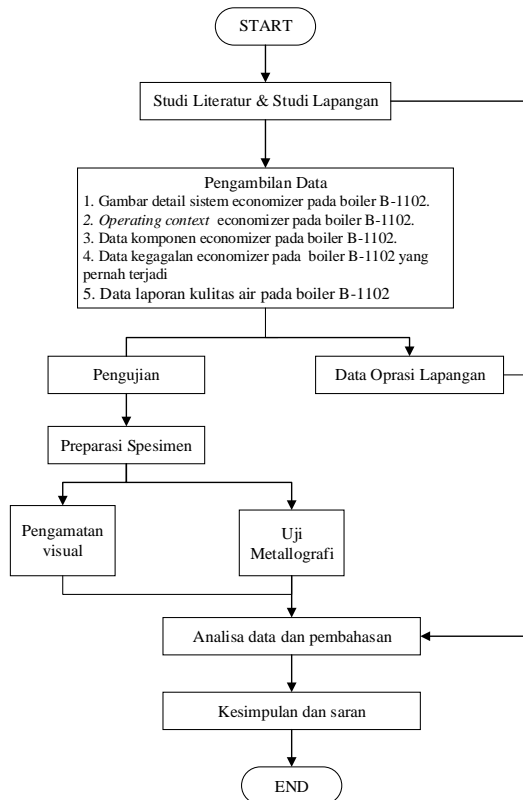
Gambar 2. 27 Pengaruh stress intensity factor terhadap kinetik SCC [15]

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan dengan mengikuti diagram alir penelitian seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, studi literatur, dan penelitian di laboratorium. Studi lapangan mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalannya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu, di PT. Petrokimia Gresik. Studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal penelitian terbaru, dan situs industri yang mempelajari permasalahan analisa kegagalan pada u-tube economizer boiler. Sedangkan penelitian di laboratorium mengacu pada pengujian-pengujian yang akan mendukung dalam proses menganalisa. Pengujian yang dilakukan antara lain, uji komposisi, metallografi, uji kekerasan, dan uji fraktografi.

3.3 BAHAN PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan u-tube economizer, yaitu SA210-A1.

Tabel 3. 1 Komposisi u-tube economizer berdasarkan ASTM A210

Unsur	Komposisi, %
Karbon*, max	0,27
Mangan	0,93
Fosfor, max	0,035
Sulfur, max	0,035
Silicon, min	0,10

*Untuk setiap pengurangan 0,01% karbon dibawah nilai maksimumnya, akan meningkatkan 0,06% mangan hingga 1,35% di atas nilai maksimumnya

Tabel 3. 2 Sifat mekanik SA210-A1 berdasarkan ASTM A210

Sifat Mekanik	Nilai
Kekuatan tensile, min, ksi [Mpa]	60 [415]
Kekuatan yield, min, ksi [Mpa]	37 [255]
Elongation in 2 in atau 50 mm, min, %	30

**Gambar 3. 2** U-tube yang mengalami kegagalan

3.4 ALAT-ALAT PENELITIAN

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
2. Kamera digital
3. Alat pemotong
4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
5. Mikroskop optik
6. Mesin grinding dan polishing

7. Resin
8. Kertas gosok dari grade 80 - 2000
9. Larutan etsa

3.5 TAHAPAN PENELITIAN

3.5.1 Data Operasional Lapangan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang mendukung penelitian. Data-data yang diambil antara lain:

1. Spesifikasi boiler
2. Desain economizer
3. Data operasi
4. Spesifikasi material

3.5.2 Preparasi Spesimen

Pertama-tama, sampel spesimen diambil dari dua u-tube, yaitu u-tube yang mengalami kegagalan dan yang masih baru. Karena dimensi yang terlalu besar, maka diperlukan proses pemotongan untuk mendapatkan bagian yang ingin diteliti. Proses pemotongan ini dilakukan dengan menggunakan gergaji, gerinda tangan, dan *cutting wheel*.



(a)



(b)



Gambar 3. 3 Alat pemotong, yaitu (a) gergaji, (b) gerinda tangan, dan (c) *cutting wheel*

a. Pengamatan Visual

Pengamatan visual (pengamatan makroskopik) dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro (kasat mata). Pengamatan ini dilakukan dengan dua bantuan alat, yaitu kamera digital. Pengamatan visual dilakukan pada komponen berikut:

1. Fotografi terhadap komponen yang mengalami kegagalan
2. Pengamatan melalui mikroskop stereo dilakukan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya.

b. Pengujian Metallografi

Pengujian metallografi ini bertujuan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX60M*.



Gambar 3. 4 Metkon Grinder and Polisher



Gambar 3. 5 Miskroskop Optik Olympus BX60M

Tahapan proses pengamatan strukturmikro dari spesimen dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen dipotong menggunakan gergaji mesin dan gerinda tangan

2. Grinding: permukaan spesimen dihaluskan menggunakan kertas gosok dengan *grade* 80, 100, 120, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500 dan 2000 yang dipasang di alat grinding (Gambar 3.4)
3. Polishing: permukaan spesimen dihaluskan menggunakan kain beludru dan serbuk alumina yang dipasang di alat grinding
4. Etching: Spesimen dietsa menggunakan nital (2% HNO_3 + 98% Alkohol)
5. Spesimen diamati menggunakan mikroskop optik (Gambar 3.5) dengan perbesaran 100x, 500x dan 1000x.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 ANALISA DATA

4.1.1 Data Operasi Lapangan

Economizer B-1102 terletak di Unit Utilitas/ Service Unit Pabrik 1. Berfungsi untuk memansakan air dengan menggunakan gas buang dari superheater boiler. Bahan bakar yang digunakan adalah gas alam.

Economizer B-1102 beroperasi pada tahun 2008, namun sejak tahun 2011 mulai mengalami kegagalan berupa kebocoran pada *u-tube* dengan frekuensi yang diperlihatkan pada Tabel 4.1. Dan beberapa kejadian kebocoran yang terjadi pada Gambar 4.1:

Tabel 4. 1 Data statistik kebocoran yang terjadi pada economizer

No	Tanggal	Deskripsi Kebocoran
1	19 Maret 2011	Bocor 1 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
2	19 April 2012	Bocor 4 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
3	11 Juni 2012	Bocor 8 ea, 6 bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan
4	1 Januari 2013	Bocor 5 ea, 3ea bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan



(a)



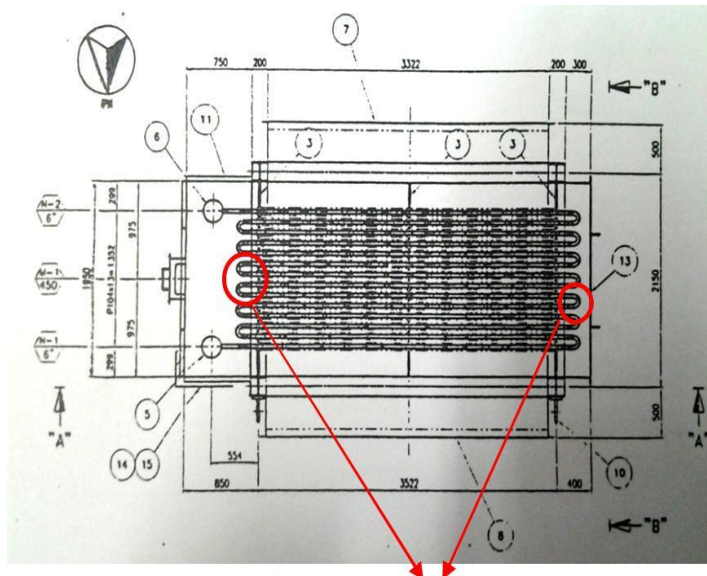
(b)

Gambar 4. 1 Kebocoran yang terjadi pada *u-tube economizer*

Berikut data-data economizer mencakup spesifikasi *tube*, desain *economizer*, operasi, dan dimensi *u-tube* yang diperlihatkan pada Tabel 4.2, Gambar 4.1, Gambar 4.2, dan Tabel 4.3.

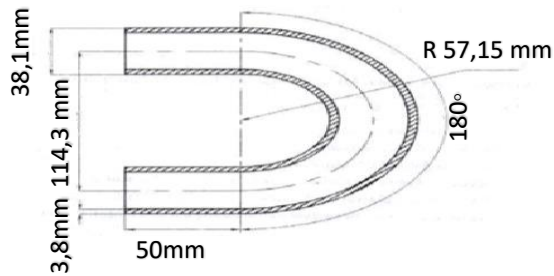
Tabel 4. 2 Spesifikasi tube

SPESIFIKASI TUBE		
Dimensi	Material	Jumlah
$\varnothing 38,1 \times t: 4,0$	SA210-A1	560



Lokasi kegagalan

Gambar 4. 2 Desain Economizer B-1102 PT. Petrokimia Gresik (tampak atas)



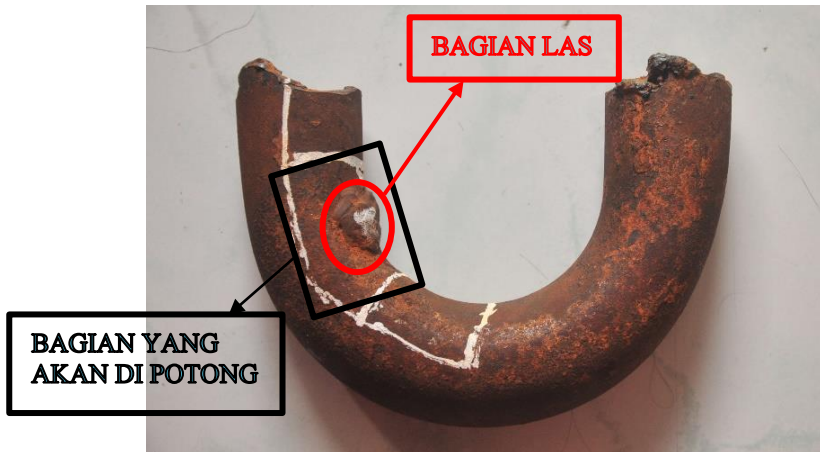
Gambar 4. 3 Dimensi u-tube

Tabel 4. 3 Data operasi pada economizer

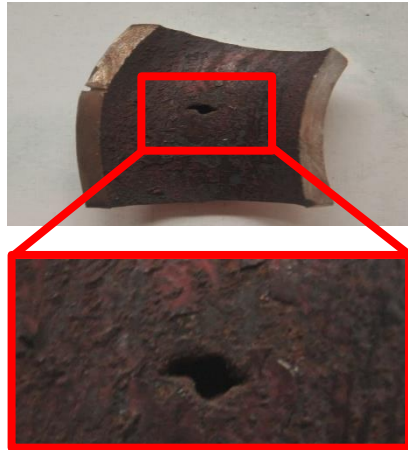
<i>Description</i>	<i>Shell side (Gas)</i>	<i>Tube side (Water)</i>
<i>Design Pressure</i>	250 mmAq	75 kg/cm ² q
<i>Operating Pressure at M.C.R. 100%</i>	54 mmAq	57 kg/cm ² q
<i>Design Temperature</i>	350 °C	350 °C
<i>Operating Temperature at M.C.R. 100% (inlet/outlet)</i>	369,9/ 167,5 °C	110 / 173,9 °C
<i>Flow Rate at M.C.R. 100%</i>	125385 Nm ² /hr	120148 kg/hr
<i>Hydrostatic Pressure</i>	-	112,5 kg/cm ² q
<i>Heating Surface</i>	2873 m ²	

4.1.2 Hasil Pengamatan Visual *U-Tube*

Pengamatan secara makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi kegagalan yang terjadi. Lokasi kegagalan terletak pada lengkungan dalam tube, namun bentuk kegagalan tidak dapat diamati dari luar. Hal ini dikarenakan bagian yang mengalami kegagalan sudah dilas sebagai upaya penanggungan oleh perusahaan. Sehingga tube harus dipotong secara melintang agar lokasi kegagalan dapat diketahui seperti terlihat pada Gambar 4.3 dan skema pemotongan tube diperlihatkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Skema pengambilan sample pada tube yang gagal



Gambar 4. 5 Sample yang telah dipotong memperlihatkan lubang pada bagian dalam tube

Spesimen yang telah dipotong menjadi sampel kemudian diamati secara visual seperti pada Gambar 4.5. Analisa visual yang dilakukan berupa pengamatan kerusakan dan pembentukan produk korosi yang terjadi pada permukaan dalam setiap sampel.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh permukaan dalam *u-tube* memiliki lapisan berwarna merah bata yang merata sepanjang permukaan pipa. Hal tersebut menunjukkan indikasi terjadi proses korosi yang berhubungan dengan air sebagai media korosif atau elektrolit. Terlihat adanya kerusakan seperti bentuk seperti *pitting corrosion* pada permukaan dalam *u-tube*.

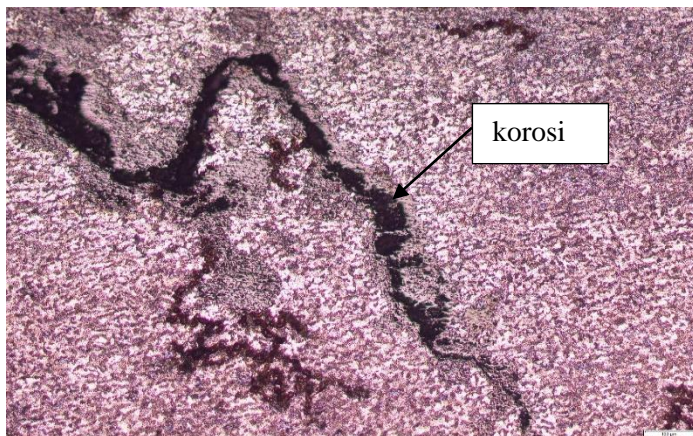
4.1.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *U-Tube*

Pengamatan mikro yang dilakukan yaitu dengan pengujian metalografi untuk mengetahui perubahan atau fenomena yang terjadi pada spesimen *u-tube* akibat lingkungan kerjanya. Spesimen *u-tube* merupakan golongan *low carbon steel* dengan

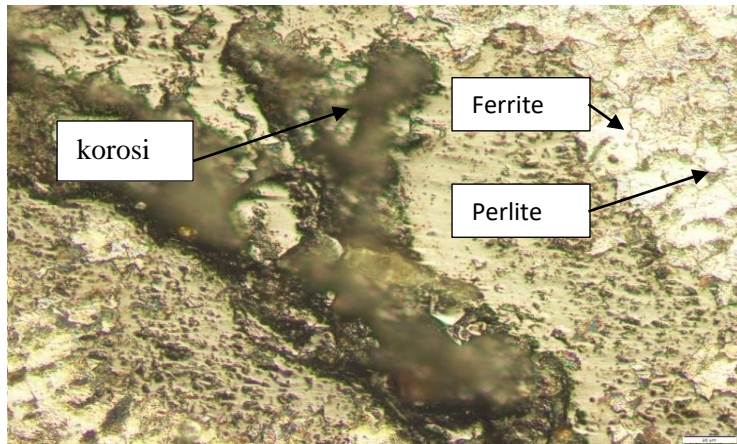
komposisi unsur karbon maksimal 0.27%. Permukaan luar *u-tube* berkontak langsung dengan gas panas sisa pembakaran boiler dan permukaan dalam *u-tube* berkontak langsung dengan aliran air. Sampel yang digunakan pada pengujian metalografi adalah specimen yang telah dipotong melintang pada bagian *u-tube*. Daerah yang dilakukan pengujian metalografi ditunjukkan seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Daerah yang dilakukan pengujian metalografi pada tube yang gagal



(a)



(b)

Gambar 4. 7 (a) Pengamatan strukturmikro u-tube yang gagal dengan perbesaran 100x dan (b) Pengamatan strukturmikro u-tube yang gagal dengan perbesaran 500x

Berdasarkan pada gambar 4.7 dapat diketahui kondisi strukturmikro dari spesimen *u-tube*. *Ferrite* yang terbentuk ditunjukkan dengan warna putih. *Pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Gambar 4.6 menunjukan adanya korosi berbentuk *mikrocrack* didalam lubang tube. Hal ini mengindikasikan kegagalan berasal dari *water-side tube* dan mencapai kedalaman diameter luar tube, sehingga tube mengalami kebocoran.

4.2 PEMBAHASAN

4.2.1 Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan

Secara visual, kegagalan ini memperlihatkan beberapa hal, yaitu:

1. *U-tube* memiliki lapisan berwarna merah bata yang merata sepanjang permukaan pipa.

2. Terdapat lubang dengan bentuk seperti *pitting corrosion* pada permukaan dalam *u-tube*.

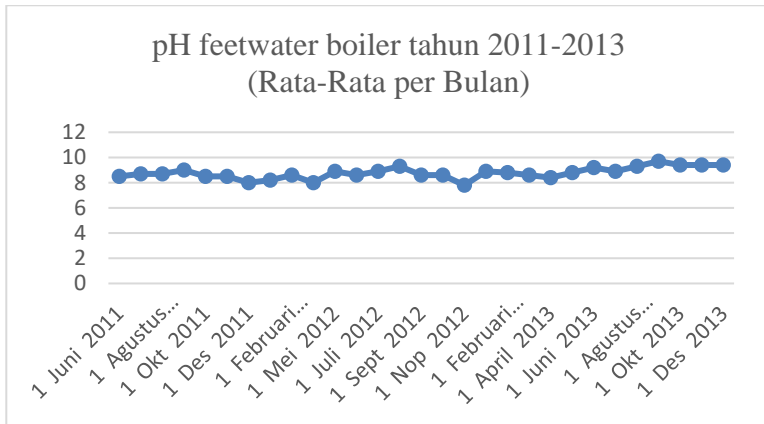
Berdasarkan pengamatan strukturmikro, menunjukkan adanya *mikrocrack* pada permukaan dalam tube. Hal ini mengindikasikan kegagalan berasal dari *water-side tube* dan mencapai kedalaman diameter luar tube, sehingga tube mengalami kebocoran. Terjadinya kegagalan pada *tube* disebabkan karena *pitting corrosion*.

Menurut Fontana, M.G. (1967) *Pitting corrosion* adalah bentuk korosi lokal, dimana produk korosinya cenderung membentuk lubang, sehingga disebut juga korosi sumuran. Lubang/pit tersebut biasanya memiliki diameter yang bervariasi, dari kecil ke besar, tetapi pada umumnya lubang tersebut berdiameter kecil. *Pitting* adalah salah satu bentuk korosi yang paling merusak.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Gusti Umindya Nur Tajjal Mahasiswa Departemen Material dan Metalurgi dengan beberapa pengujian menyimpulkan bahwa kegagalan yang terjadi pada *u-tube economizer* yaitu karena *stress cracing corrosion*. Faktor utama penyebab kegagalan *stress corrosion cracking* (SCC) pada *u-tube SA210-A1* adalah adanya *residual stress* akibat proses *cold bending* dan persentase regangan melebihi standar yang telah ditentukan dan Mekanisme terjadinya SCC dipicu dengan adanya regangan yang besar membentuk *microcrack* di permukaan tube. Lapis pelindung magnetite [Fe_3O_4] yang semula resistan terhadap korosi, tidak mampu lagi melindungi karena terjadinya penurunan pH. Sehingga *impurities* memasuki *crack* dan menyebabkan segregasi karbida. Selain itu, reaksi elektrokimia anatar Fe dan H_2O memicu perambatan *crack* hingga menembus diameter luar tube.

Kesimpulan tersebut kurang tepat karena pembendungan yang dilakukan pada *u-tube* dilakukan secara hot bending sehingga tidak ada residual stress pada *u-tube*. Dan Tidak terjadi penurunan pH secara signifikan sehingga korosi yang

terjadi bukan karena penurunan pH. Hal ini dibuktikan bahwa pH masih dalam keadaan basa dengan standar minimal pH =7 seperti pada gambar 4.8.

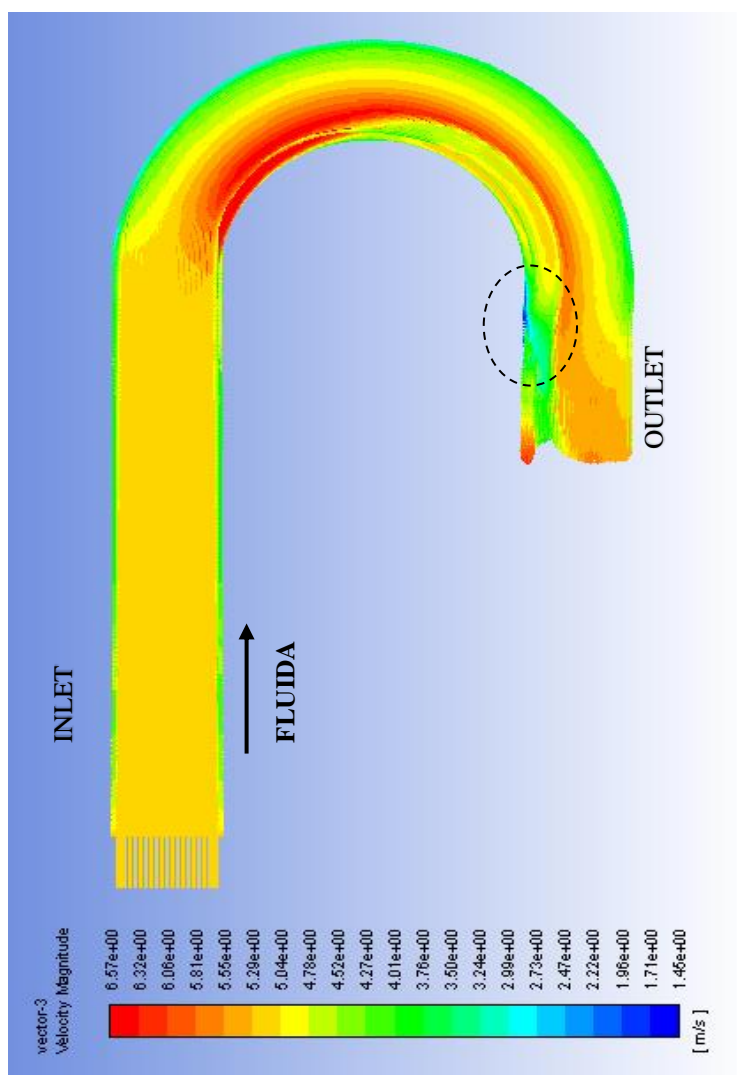


Gambar 4. 8 Rata-rata pH feetwater boiler tahun 2011-2013

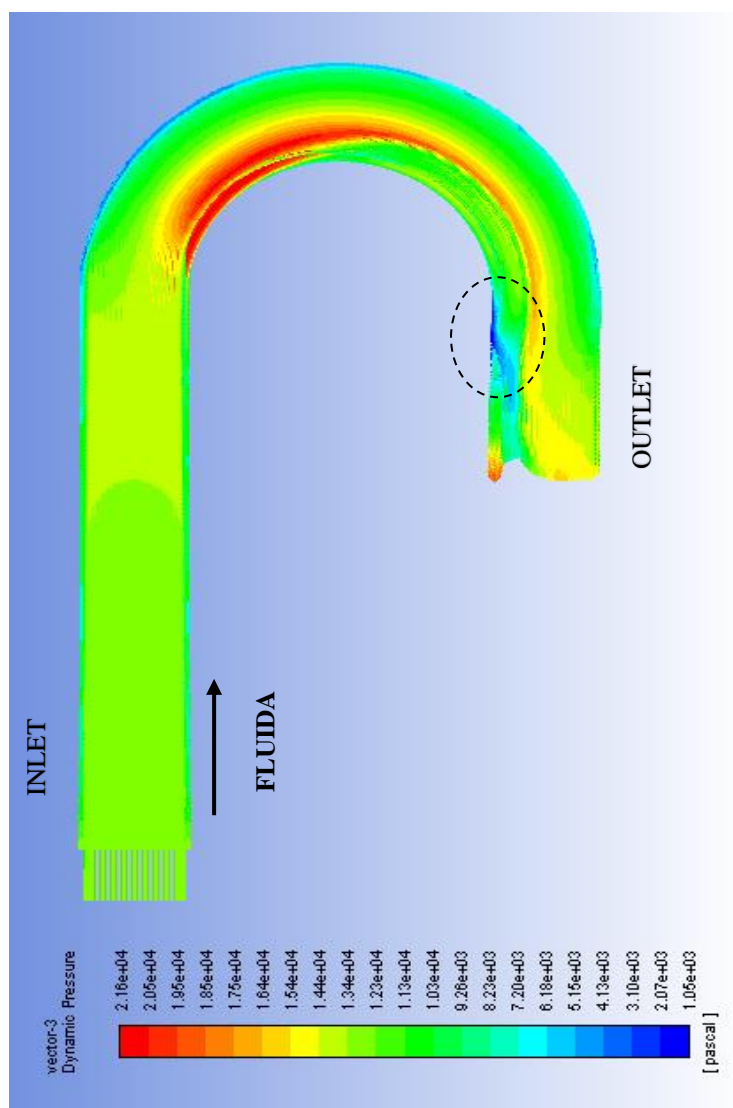
Dari kesimpulan penelitian sebelumnya menyatakan bahwa kerusakan yang terjadi Karena erosi corrosion dan *forming* yang tidak tepat.

Kesimpulan ini juga kurang tepat karena kegagalan pada *u-tube* tidak ada pengurangan ketebalan dan *forming* pada *u-tube* sudah sesuai dengan standar ASTM.

Maka untuk mendapatkan kesimpulan yang sesuai dalam penelitian ini, Selain melakukan beberapa pengujian terhadap material seperti pengamatan visual dan metalografi Dalam penelitian ini juga melakukan simulasi aliran untuk mengetahui kegagalan yang terjadi pada *u-tube economizer*.



(a)



(b)

KETERANGAN:



= kecepatan dan
Tekanan aliran tinggi



= kecepatan dan Tekanan
aliran normal



= kecepatan dan
Tekanan aliran rendah

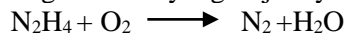
Gambar 4. 9 (a) Hasil simulasi *velocity magnitude* pada *u-tube economizer* dan (b) Hasil simulasi *Dinamic pressure* pada *u-tube economizer*

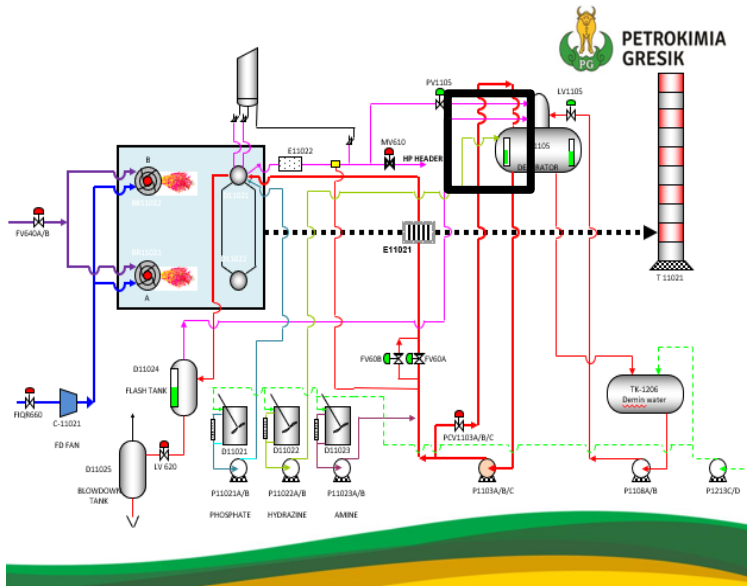
Gambar 4.9 merupakan hasil simulasi fluent pada *u-tube* dimana kecepatan aliran (v) yang masuk dalam *tube* yaitu 5.098 m/s dan Reynold number (Re) melebihi 2300 yang mengindikasikan aliran dalam keadaan turbulents. Pada gambar 4.9 (a) menunjukkan dimana kecepatan aliran maksimum terjadi sebesar 657 m/s pada bagian sisi dalam *u-tube* yang ditandai dengan warna merah. Terjadi penurunan terbesar kecepatan aliran menjadi 145 m/s pada bagian sisi dalam *u-tube* outlet dengan warna biru. Pada gambar 4.9 (b) menunjukkan dimana tekanan aliran maksimum terjadi sebesar 2.16×10^4 pascal pada bagian sisi dalam *u-tube* yang ditandai dengan warna merah. Terjadi penurunan terbesar tekanan aliran menjadi 1.05×10^3 pascal pada bagian sisi dalam *u-tube* outlet dengan warna biru.

Dari pengujian dan simulasi kegagalan yang terjadi pada *u-tube economizer* karena *pitting corrosion*. *pitting corrosion* terjadi akibat adanya oksigen terlarut yang masuk pada *u-tube*, Sehingga pada saat aliran air mengalami penurunan tekanan dan terjadi tubulents mengakibatkan oksigen

terangkat keatas dan mengoksidasi permukaan dalam *u-tube* yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Hal ini berlangsung terus-menerus hingga akhirnya pada permukaan *tube* tersebut cenderung menjadi lebih cekung dibanding permukaan *tube* yang lain. Periode akhir dari reaksi ini adalah terbentuknya lubang akibat korosi.

Pada proses pengelolaan air boiler aplikasi bahan kimia *oxygen scavenger* yang merupakan penghilang kandungan oksigen pada air umpan boiler sebagai pencegah karat (*corrosion inhibitor*) pada *tube* boiler. Ada beberapa bahan kimia yang dapat difungsikan sebagai *oxygen scavenger*, misalnya *Hydrazine* (tidak diizinkan untuk pabrik-pabrik yang mengolah bahan makanan), *Sodium Sulfide* (dapat digunakan untuk pabrik-pabrik yang mengolah bahan makanan = food grade). Agar kecepatan reaksi bahan kimia *oxygen scavenger* mengikat oksigen meningkat menjadi keharusan setiap bahan kimia tersebut ditambahkan *catalyst*. Bahan kimia *oxygen scavenger* yang di gunakan PT. Petrokimia Gresik yaitu *Hydrazine* (N_4H_2). Dengan reaksi yang terjadi yaitu

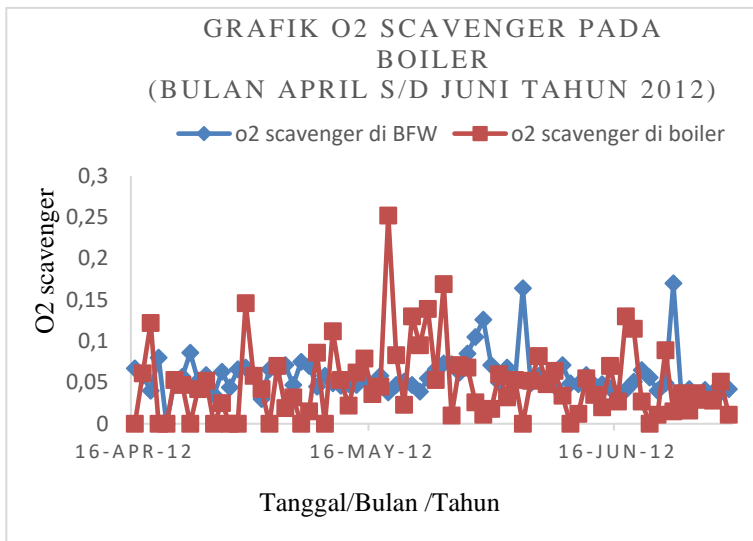
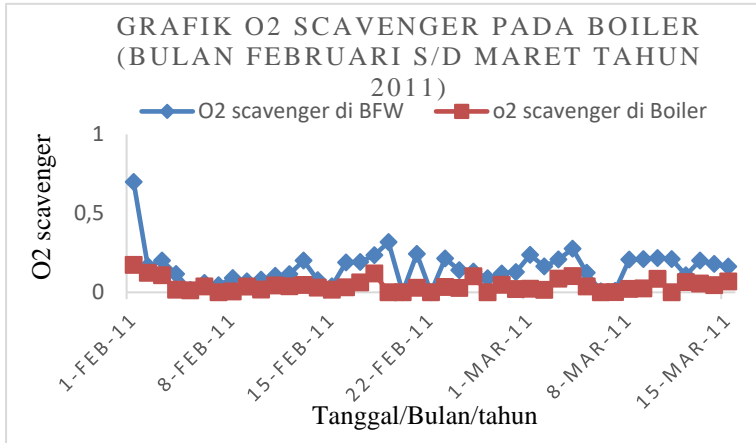


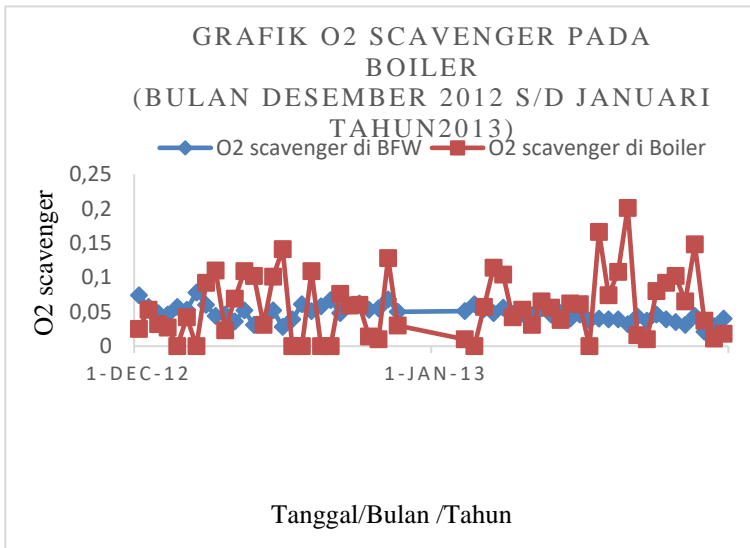


Gambar 4. 10 Siklus boiler

Pada operasi rutin deaerator, *oxygen scavenger* yang berfungsi untuk menghilangkan oksigen terlarut di injeksikan melalui nozzle yang disemburkan secara *continue* ke deaerator (Gambar 4.10) dengan volume antara 0.01-2 ppm. Pengecekan kadar *oxygen scavenger* dilakukan pada steam drum. Pengecekan kadar *oxygen scavenger* yang dilakukan yaitu melihat kadar *oxygen scavenger* pada boiler feed water (BFW) dan di boiler. Hasil pengecekan menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan dimana kadar sisa dalam BFW lebih besar dari pada di boiler. yang berarti, *oxygen scavenger* yang di dalam deaerator belum bereaksi secara sempurna karena adanya fluktuasi temperatur, sehingga oksigen terlarut masih lolos hingga ke *economizer* yang mengakibatkan terjadinya korosi pada *u-tube economizer*. Hal ini dibuktikan dengan

adanya oksigen terlarut pada boiler akibat tidak terdeteksi *oxygen scavenger* pada waktu pengecekan seperti pada gambar 4.11.





Gambar 4. 11 Grafik oxygen corrosion pada boiler tahun 2011-2013

4.3 SOLUSI DAN REKOMENDASI

Untuk mengatasi korosi akibat oksigen terlarut pada *u-tube economizer* maka dosis *Hydrazine* harus lebih tinggi dari kebutuhan yang telah ditentukan, artinya musti ada tersedia *free residual Hydrazine* untuk mengantisipasi adanya Oksigen di dearator.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisa dan pengujian dilakukan untuk menentukan permasalahan yang terjadi pada kasus bocornya *u-tube*, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:
 - a. Struktur mikro maupun fisik tidak menunjukkan adanya pengaruh gaya mekanik saat operasi terhadap terjadinya kerusakan.
 - b. Kerusakan yang berupa kebocoran dimulai dari munculnya korosi dari permukaan dalam *tube* akibat korosi *pitting*.
2. Solusi dan rekomendasi yang akan diajukan agar kegagalan yang serupa tidak terulang lagi adalah menambahkan dosis *Hydrazine* dari kebutuhan yang telah ditentukan, sehingga tersedia *free residual Hydrazine* untuk mengantisipasi adanya Oksigen di dearator.

5.2 SARAN

Beberapa hal yang dapat disarankan untuk pencegahan dan penanganan kerusakan ini adalah sebagai berikut.

1. *Track record* data selengkap mungkin secara kontinu diperlukan agar nantinya jika terjadi kerusakan dapat ditelusuri penyebabnya dengan lebih mudah.
2. Parameter-parameter proses operasi dan *maintenance* hendaknya sesuai dengan SOP dan perlu diperhatikan dengan seksama agar tidak menimbulkan deviasi fungsi yang dimiliki.
3. Jika ada kerusakan pada satu komponen, perlu dilakukan pengecekan juga terhadap komponen lain yang berhubungan untuk pencegahan kerusakan lebih lanjut.

4. Untuk penelitian lebih lanjut, diperlukan analisa lebih detail mengenai karakteristik fluida agar diketahui seberapa besar pengaruhnya terhadap turbulensi yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Effendi, H., 2008. *Studi Kasus Kegagalan Material ASTM A335/P12 dalam Aplikasi Boiler Steam Pipe*, Jakarta: Universitas Indonesia.
2. Teir, S. & Kulla, A., 2002. *Steam/Water Circulation Design*. Helsinki: Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering.
3. Nag, P. K., 2006. *Power Plant Engineering*. 2nd penyunt. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
4. Brook, C. R. & Choudury, A., 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw Hills
5. Craig, B. D., Lane, R. A. & Rose, D. H., 2006. *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials*. 2nd penyunt. New York: AMMTIAC.
6. Ahmad, Z., 2006. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
7. Davis, J.R. 1999. *Heat-Resistant Materials*. 2nd penyunt. Materials Park: ASM Internasional.
8. Schweitzer, P. A., 1996. *Corroison Engeneering Handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc
9. *ASM Metals HandBook Volume 13 1992 - Corrosion*. 9th penyunt. Material
10. Fontana, M.G. 1967. **Corrosion Engineering**, 2nd ed. New York: Mcgraw-Hill Book Company.
11. Port, Robert D & Herro Harvey M..1991 *The Nalco guide to boiler failure analysis / the Nalco ChemicalCompany* New York: McGraw Hills
12. Cheng, Y. F., 2013. *Stress Corrosion Crack of Pipelines*. New Jersey: John Willey and Sons, Inc

13. *ASM Metals HandBook Volume 11 2002 - Failure Analysis and Prevention*. Material Park: ASM International.
14. Stansbury, E. E. & Buchanan, R. A., 2000. *Fundamental of Electrochemical Corrosion*. Materials Park: ASM Internasional.
15. Jones, Denny A., 1996. Principles and prevention of corrosion second edition. The United States of America: Prentice-Hall, Inc.

BIODATA PENULIS



Nabil, dilahirkan pada tanggal 23 Agustus 1993 di Surabaya. Merupakan anak ke 2 dari 4 bersaudara dari pasangan Anis Badres dan Luluk Ba'atwah. Penulis telah menempuh pendidikan dasar dan menengah di SD Tamiriyah Surabaya, SMP Tamiriyah Surabaya dan SMA Tamiriyah Surabaya.

Setelah lulus dari SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan tingginya di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS melalui jalur SNMPTN Tulis, dengan mengambil bidang studi Sistem Rekayasa Industri. Selama menjadi mahasiswa, penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT PJB Gresik, sebelum akhirnya melakukan penelitian tugas akhir di PT Petrokimia Gresik.

Penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan dan kepanitiaan *event* mahasiswa dengan menjadi Panitia Mechom 2013, Panitia Mechit 2014 serta menjadi Dewan Presidium HMM 2014-2015 dan Ketua Departemen PSDM Lembaga Dakwah As-Shaff Teknik Mesin. Penulis juga mengikuti berbagai pelatihan manajemen diri, kegiatan, dan organisasi. Penulis dapat dihubungi melalui *email* berikut: nabil.badres@gmail.com atau nomer HP: **087851527191**